



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS
CAMPUS VERACRUZ

POSGRADO EN AGROECOSISTEMAS TROPICALES

NUTRICIÓN ORGÁNICA DEL AGROECOSISTEMA CAFÉ (*Coffea arabica* L.) EN LA TRANSICIÓN DE DESARROLLO VEGETATIVO-REPRODUCTIVO EN SIMOJOVEL, CHIAPAS

FLORENTINO LÓPEZ DÍAZ

TESIS

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL

PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS

Tepetates, Manlio Fabio Altamirano, Veracruz, México.

2022



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

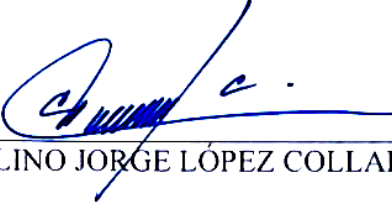
INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

La presente tesis titulada: “**Nutrición orgánica del agroecosistema café (*Coffea arabica* L.) en la transición de desarrollo vegetativo-reproductivo en Simojovel, Chiapas**” realizada por el alumno “**Florentino López Díaz**” bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS
AGROECOSISTEMAS TROPICALES

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO


DR. CATALINO JORGE LÓPEZ COLLADO

ASESOR


DR. MARTÍN ALONSO MENDOZA BRISEÑO

ASESOR


DR. ALEJANDRO ALONSO LÓPEZ

ASESOR


DR. ESTEBAN ESCAMILLA PRADO

Tepetates, Manlio Fabio Altamirano, Veracruz, México, diciembre de 2022

NUTRICIÓN ORGÁNICA DEL AGROECOSISTEMA CAFÉ (*Coffea arabica* L.) EN LA TRANSICIÓN DESARROLLO VEGETATIVO-REPRODUCTIVO EN SIMOJOVEL, CHIAPAS

Florentino López Díaz, M.C.

Colegio de Postgraduados, 2022

RESUMEN

El agroecosistema café orgánico en México presenta una gran complejidad socioambiental. Los cafetales orgánicos presentan un bajo manejo nutricional que se refleja con la baja producción del cultivo. El objetivo de la investigación fue evaluar el efecto de abono orgánico aplicado al suelo como fuente principal en cafetos en la fase de desarrollo vegetativo y primer ensayo de producción. El estudio se realizó en un cafetal de la variedad Colombia con manejo orgánico en la comunidad de Yuquín, municipio de Simojovel, Chiapas. Se evaluaron cuatro tratamientos que corresponden a diferentes niveles de lombricomposta aplicados por planta: T0 (testigo sin abonar), T1 (1kg de lombricomposta), T2 (2 kg de lombricomposta) y T3 (3 kg de lombricomposta); los tratamientos se aplicaron una sola una vez al inicio de la fase experimental. El diseño experimental fue bloques completamente al azar de cuatro tratamientos y seis repeticiones por tratamiento. Al finalizar el experimento de campo, se tomaron muestras de suelo y foliar para su análisis de laboratorio. Las variables evaluadas fueron: altura de la planta, diámetro de tallo, número total de hojas, número total de ramas y el número de frutos del primer ensayo de producción. Se caracterizó al suelo y al tejido vegetal con base en los análisis químicos. Los datos se sometieron a un análisis de varianza y pruebas de medias de Tukey. Los resultados no mostraron diferencias significativas en el crecimiento y desarrollo vegetativo de los cafetos, a excepción de la variable número de frutos que respondió positivamente a la aplicación del T3. La aplicación del T3 afectó ligeramente a los contenidos de macronutrientes N, P, K, Ca y Mg en el suelo, pero el P disponible fue muy bajo en todos los tratamientos aplicados. Los incrementos de Ca y Mg pueden estar atribuido por la aplicación de cal dolomita al suelo. Los micronutrientes Fe, Mn y Cu obtuvieron valores altos en todos los tratamientos aplicados al suelo, respecto el contenido de Zn, los valores fueron muy bajos en todos los tratamientos. Los contenidos foliares de macronutrientes N, P, y K fueron óptimos en todos los tratamientos. El P disponible fue bajo en el suelo, pero en las hojas alcanzó valores óptimos; esto puede deberse a la diversidad de microorganismos, principalmente a la asociación de micorrizas que favorecen a la solubilización del fósforo. Los contenidos foliares de micronutrientes Fe, Cu, Mn, Zn y B tuvo niveles óptimos y altos. Se concluye que la aplicación de diferentes niveles de lombricomposta no afectó a las variables altura de la planta, diámetro de tallo, número total de hojas, número total de ramas. Mientras que la aplicación de 3 kg de lombricomposta aumentó el número de frutos del primer ensayo de producción en un 83% respecto al testigo.

Palabras claves: abono orgánico, lombricomposta, agroecosistema café, Simojovel, café orgánico, desarrollo vegetativo

ORGANIC NUTRITION OF THE COFFEE (*Coffea arabica* L.) AGROECOSYSTEM IN THE VEGETATIVE DEVELOPMENT PHASE IN SIMOJOVEL, CHIAPAS

Florentino López Díaz, M.C.

Colegio de Postgraduados, 2022

ABSTRACT

The organic coffee agroecosystem in Mexico presents a great socio-environmental complexity. Organic coffee plantations present a low nutritional management that is reflected in the low production of the crop. The objective of this research was to evaluate the effect of organic fertilizer applied to the soil as the main source in the coffee plants in the vegetative development phase and fist production trial. The study was carried out in a coffee plantation of the Colombia variety with organic management in the community of Yuquín, municipality of Simojovel, Chiapas. Four treatments corresponding to different levels of vermicompost applied per plant were evaluated: T0 (control without fertilization), T1 (1 kg of vermicompost), T2 (2 kg of vermicompost) and T3 (3 kg of vermicompost); treatments were applied only once at the beginning of the experimental phase. The experimental design was completely randomized blocks with four treatments and six replications per treatment. At the end of the field experiment, soil and leaf samples were taken for laboratory analysis. The variables evaluated were: plant height, stem diameter, total number of leaves, total number of branches and the number of fruits of the first production trial. The soil and plant tissue were characterized based on chemical analysis. The data were subjected to an analysis of variance and Tukey's tests of means. The results did not show significant differences in the growth and vegetative development of the coffee plants, with the exception of the variable number of fruits that responded positively to the application of T3. The application of T3 slightly affected the contents of macronutrients N, P, K, Ca and Mg in the soil, but the available P was very low in all the applied treatments. The increases in Ca and Mg can be attributed to the application of dolomite lime to the soil. The micronutrients Fe, Mn and Cu obtained high values in all the treatments applied to the soil, regarding the Zn content, the values were very low in all the treatments. The foliar contents of macronutrients N, P, and K were optimal in all treatments. The available P was low in the soil, but in the leaves it reached optimal values; this may be due to the diversity of microorganisms, mainly to the association of mycorrhizas that favor the solubilization of phosphorus. The foliar contents of micronutrients Fe, Cu, Mn, Zn and B had optimal and high levels. It is concluded that the application of different levels of vermicompost did not affect the variables plant height, stem diameter, total number of leaves, total number of branches. While the application of 3 kg of vermicompost increased the number of fruits of the first production trial by 83% with respect to the control.

Keywords: organic fertilizer, vermicompost, coffee agroecosystem, Simojovel, organic coffee, vegetative development

DEDICATORIA

A Don José y Doña Floriselia, mis padres, que me han enseñado a valorar el esfuerzo y aprovechar las oportunidades, a pesar de las adversidades.

A todos mis hermanos y tía Manuela, gracias por su apoyo incondicional.

A mis profesores: mis mentores, mis guías, mis amigos que me formaron en el hermoso mundo del café.

AGRADECIMIENTOS

Al Programa de Becas de Posgrado para Indígenas (PROBEPI) por los cursos y seguimiento que me otorgaron para el ingreso al posgrado.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por otorgarme la beca para poder realizar mis estudios de Maestría en Ciencias.

Al Colegio de Postgraduados - Campus Veracruz, al Programa de Agroecosistemas Tropicales por permitirme realizar mis estudios de Maestría en Ciencias.

A mi consejero, Dr. Catalino Jorge López Collado por su apoyo y paciencia en el proceso de formación del Posgrado.

A mis asesores, Dr. Martín Alfonso Mendoza Briseño, Dr. Alejandro Alonso López y Dr. Esteban Escamilla Prado por su valioso apoyo en la elaboración del manuscrito.

A los profesores que me apoyaron para mi formación profesional, así como al personal administrativo que me apoyaron en los trámites a pesar de las complicaciones derivadas de la situación de la pandemia COVID 19.

Especialmente agradezco a mi hermano Ciro y sobrinos que me apoyaron para el establecimiento de la parcela experimental y registro de datos en campo.

CONTENIDO

RESUMEN.....	iii
ABSTRACT.....	iv
DEDICATORIA.....	v
AGRADECIMIENTOS.....	vi
LISTA DE FIGURAS.....	ix
LISTA DE CUADROS.....	x
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. REVISIÓN DE LITERATURA.....	2
2.1. Importancia del café en México.....	2
2.2. El concepto agroecosistema.....	3
2.3. El agroecosistema café orgánico.....	4
2.4. Los Abonos orgánicos.....	5
2.5. Definición de fase de desarrollo vegetativo del cafeto.....	5
2.6. Nutrientes esenciales en las plantas.....	6
2.7. Propiedades químicas y fisicoquímicas del suelo.....	8
2.7.1. Reacción del suelo o acidez (pH).....	8
2.7.2. Capacidad de intercambio catiónico (CIC).....	8
2.7.3. La materia orgánica (MO).....	9
2.8. Requerimientos agroecológicos del cultivo de café.....	9
2.9. Requerimientos nutricionales.....	9
III. OBJETIVOS E HIPÓTESIS.....	11
3.1. Hipótesis.....	11
3.1.1. Objetivo general.....	11
3.1.2. Objetivos específicos.....	11
IV. MATERIALES Y MÉTODOS.....	11
4.1. Ubicación geográfica.....	11
4.1.1. Ubicación de la parcela experimental.....	12
4.2. Establecimiento de la parcela experimental.....	13
4.2.1. Material vegetal.....	13
4.2.2. Diseño experimental.....	13

4.2.3.	Muestreo de suelo.....	14
4.2.4.	Muestreo foliar	14
4.3.	Métodos y procedimientos de análisis de suelo, foliar y lombricomposta	14
4.4.	Aplicación de tratamientos (lombricomposta)	15
4.5.	Manejo de la parcela experimental.....	16
4.5.1.	Control de arvenses.....	16
4.5.2.	Aplicación de cal dolomita	16
4.5.3.	Aplicación de caldo mineral.....	16
4.6.	Registro de datos aéreos	17
4.7.	Análisis de resultados.....	17
V.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	17
5.1.	Características físicas del suelo.....	17
5.2.	Características químicas del suelo	18
5.2.1.	Contenido de macronutrientes (N, P, K, Ca y Mg).....	19
5.2.2.	Contenido de micronutrientes (Fe, Mn, Cu, Zn y B).....	20
5.3.	Resultados del análisis foliar	21
5.3.1.	Contenido de macronutrientes (N, P, K, Ca y Mg).....	21
5.3.2.	Contenido de micronutrientes (Fe, Cu, Zn, Mn y B).....	22
5.4.	Análisis estadístico de las variables	23
5.4.1.	Altura de la planta	24
5.4.2.	Diámetro de tallo.....	25
5.4.3.	Número total de hojas.....	26
5.4.4.	Número total de ramas	27
5.4.5.	Frutos del primer ensayo de producción	28
VI.	CONCLUSIONES.....	29
VII.	RECOMENDACIONES	30
VIII.	LITERATURA CITADA	30
	ANEXOS.....	37

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Principales países productores de café a nivel mundial (millones de sacos de 60 kg).	2
Figura 2. Ubicación geográfica del municipio de Simojovel, Chiapas	12
Figura 3. Ubicación de la parcela experimental en Yuquín, Simojovel, Chiapas.	12
Figura 4. Distribución de plantas dentro de la parcela experimental.....	13
Figura 5. Gráfica del análisis de varianza de la variable altura de la planta (Tukey, $P \leq 0.05$).	25
Figura 6. Gráfica del análisis de varianza de la variable diámetro de tallo (Tukey, $P \leq 0.05$).	26
Figura 7. Gráfica del análisis de varianza de la variable número total de hojas (Tukey, $P \leq 0.05$).	27
Figura 8. Gráfica del análisis de varianza de la variable número total de ramas (Tukey, $P \leq 0.05$).	28
Figura 9. Gráfica de análisis de varianza de la variable de frutos del primer ensayo de producción (Tukey, $P \leq 0.05$)	29

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Los principales estados productores de café en México.	3
Cuadro 2. Nutrientes esenciales y sus funciones en la planta.	7
Cuadro 3. Requerimientos edafoclimáticos para el cultivo de café (Coffea arabica L.).	9
Cuadro 4. Rangos óptimos de nutrientes del suelo para el cultivo café (Coffea arabica L.).	10
Cuadro 5. Rangos óptimos de contenido de nutriente en las hojas de café (Coffea arabica L.).	10
Cuadro 6. Resultado del análisis de la lombricomposta comercial aplicada a las plantas.	15
Cuadro 7. Cantidad de ingredientes para preparar 100 L caldo visosa.	16
Cuadro 8. Características físicas del suelo a la aplicación de los cuatro tratamientos de lombricomposta.	18
Cuadro 9. Características químicas del suelo a la aplicación de los cuatro tratamientos de lombricomposta a las plantas.	19
Cuadro 10. Contenido de nutrientes en las hojas a la aplicación de los cuatro tratamientos de lombricomposta a las plantas.	23
Cuadro 11. Análisis de varianza de las variables respuestas medidas en campo.	24

I. INTRODUCCIÓN

La producción de café en Chiapas es una de las actividades productivas más importantes en términos económicos, sociales, culturales y ambientales (López *et al.*, 2016). En el estudio de (Escamilla, 2007) se encontró que el agroecosistema café orgánico posee componentes de sustentabilidad ambiental, pero con baja productividad relacionada con el limitado manejo tecnológico del cultivo.

El agroecosistema de café con manejo orgánico de México se caracteriza por su gran diversidad agroclimáticas (Escamilla *et al.*, 2005), la mayoría de ellos se ubican en terrenos con relieve abrupto y contextura franca; son suelos con pH muy ácido y con contenido alto de aluminio intercambiable, materia orgánica (MO), N total, Fe y P (Rosas *et al.*, 2008).

En suelos minerales ácidos con pH inferior a 5.5 gran proporción de los sitios de intercambio de las arcillas está ocupado por aluminio, en donde este reemplaza otros cationes como el Mg^{2+} y el Ca^{2+} y simultáneamente se adsorbe a los fosfatos, que inhibe el crecimiento radicular (Casierra y Aguilar, 2007). La alternativa más común para corregir la acidez del suelo consiste en la aplicación de enmiendas calcáreas (Sadeghian y Díaz, 2020).

El desarrollo vegetativo del cafeto comprende desde el establecimiento en campo, hasta el momento en que por lo menos el 50% de las plantas hayan florecido, aproximadamente 11 meses. Durante este período, la planta está formando principalmente raíces, ramas y hojas (Arcila y Farfán, 2007). Los requerimientos de nutrientes en esta etapa se incrementan proporcionalmente a la edad del cultivo; en esta fase el nitrógeno y fósforo son los elementos de mayor requerimiento, la necesidad de potasio aumenta después de las primeras floraciones (Sadeghian, 2013).

En suelos con manejo orgánico de bajo contenido nutrimental necesario la aplicación de enmiendas agrícolas como la harina de hueso, roca fosfórica, y otros abonos orgánicos para incrementar la actividad microbiana del suelo (Pool *et al.*, 1998). Los abonos orgánicos han sido catalogados principalmente como enmiendas o mejoradores de suelo (Castro *et al.*, 2009). La aplicación de enmiendas orgánicas es una práctica que se hace regularmente en sistemas de cultivos, con el fin de mejorar propiedades físicas y químicas del suelo y aportar nutrientes como nitrógeno (N) (Monsalve *et al.*, 2017). El objetivo de la investigación es evaluar el efecto de abono orgánico

aplicado al suelo como fuente principal en cafetos en la fase de desarrollo vegetativo y primer ensayo de producción.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Importancia del café en México

A nivel mundial los países de Brasil, Vietnam y Colombia ocupan los tres primeros lugares como productores de café que representa el 71% de la producción de café a nivel global. Pero sólo en Brasil, la producción de café en 2020 fue de 58.2 millones de sacos de 60 kg que representa el 40% de la producción a nivel mundial (Figura 1).

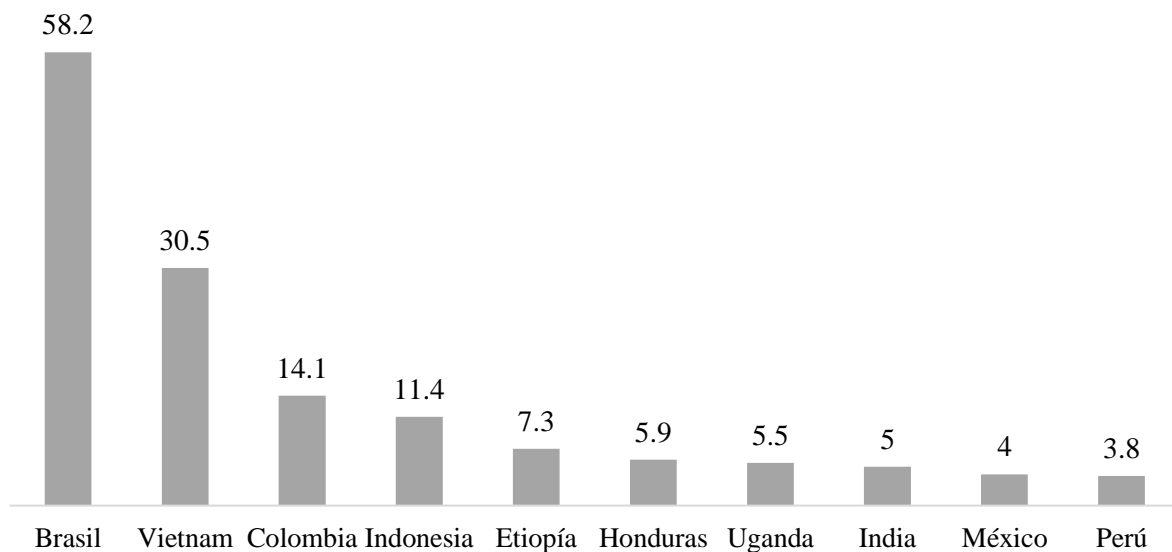


Figura 1. Principales países productores de café a nivel mundial (millones de sacos de 60 kg).
Elaboración propia a partir de datos de la (OIC, 2020)

Mientras que México ocupa el noveno lugar con una producción de 4 millones de sacos de 60 kg que representa el 3% de la producción mundial (Figura 1) (OIC, 2020).

Según datos de SIAP (2021) en México se cultivan café en 14 estados (Cuadro 1). Siendo Chiapas, Veracruz, Puebla, Oaxaca y Guerrero los cinco principales estados productores del aromático que aportan el 94% de la producción a nivel nacional, pero los estados de Chiapas (41%) y Veracruz

(24%) son los líderes en la producción del aromático que aportan el 65% de la producción de café cereza a nivel nacional.

Cuadro 1. Los principales estados productores de café en México.

Entidad	Sembrada (ha)	Cosechada (ha)	Producción cereza (Toneladas)	Valor de producción (Miles de peso MXN)
Chiapas	253,457.82	239,265.67	384,549.72	1,894,217.29
Veracruz	145,210.51	126,543.51	229,849.02	1,342,698.82
Puebla	70,673.99	65,145.00	149,549.09	876,352.97
Oaxaca	134,171.77	112,696.07	85,903.69	456,615.13
Guerrero	45,549.38	40,489.00	39,132.51	280,118.89
Hidalgo	23,069.50	23,014.50	29,301.60	187,940.07
San Luis Potosí	16,149.30	16,146.30	9,802.43	42,875.10
Nayarit	15,296.68	11,184.68	9,680.18	71,109.65
Jalisco	3,483.00	3,483.00	4,772.17	30,072.89
Colima	2,719.75	2,717.75	3,392.58	19,722.38
México	530.81	530.81	639.89	4,848.77
Tabasco	357.5	357.5	420.95	3,256.78
Querétaro	199	199	59.7	603.27
Morelos	28.4	26.6	38.68	182.05
Total	710,897.41	641,799.39	947,092.21	5,210,614.06

Datos tomados de (SIAP, 2021)

2.2. El concepto agroecosistema

La teoría general de sistemas representó una innovación teórica para integrar el conocimiento científico, que trasciende más allá del enfoque reduccionista e inductivo en las ciencias (Bertalanffy, 1968).

El agroecosistema (AES) tiene sus cimientos en la teoría de sistemas en los que no hay unidades aisladas, sino que todas las partes se interrelacionan con la misma orientación y propósito común que garantizan un desempeño efectivo en absoluto como un todo (Chiavenato, 1997).

El AES como proceso de producción se diseña para satisfacer las necesidades de bienes y servicios de la sociedad. El controlador del proceso es el hombre que se encuentra en un contexto local, nacional y global de factores sociales determinantes con elementos naturales que condicionan su acción (Platas *et al.*, 2017).

Se considera al AES como la unidad de estudio en diferentes niveles jerárquicos de los sistemas de producción primaria en los que se establece el manejo del hombre para su aprovechamiento mediante la adaptación, modificación e interacción con los recursos naturales para la producción de alimentos y servicios que requiere la sociedad, principalmente del medio rural (Platas *et al.*, 2016).

2.3. El agroecosistema café orgánico

Se refiere a producto orgánico, ecológico o biológico, aquel cuyo cultivo no utiliza productos químicos sintéticos, no produce ninguna forma de contaminación ambiental e involucra prácticas que favorece la conservación de la biodiversidad, suelo y agua; se rige por normas de producción y procesamiento, son vigiladas mediante un proceso de certificación que garantiza al consumidor alimentos de calidad sin la presencia de residuos químicos (CERTIMEX, 1998; Sosa *et al.*, 2004).

Los principales estados productores de café orgánico son: Chiapas, Nayarit, Oaxaca, Puebla y Colima. El estado de Chiapas es el líder en la producción de café orgánico con una producción de 28,506 toneladas de café cereza que representa el 81% de la producción nacional, mientras que Nayarit, Oaxaca, Puebla y Colima tienen una producción de 3200.38 t, 2,810.15 t, 607.07 t, 222.91t, respectivamente (SIAP, 2021).

Los agroecosistemas cafeteros en México son sistemas complejos que interrelaciona factores socio culturales, ambientales, ecológicos y económicos (Rosales *et al.*, 2020). El agroecosistema cafetalero bajo sombra contribuye a mitigar la pérdida de los servicios ambientales; no entra en conflicto con la conservación de los ecosistemas de montaña (Ruelas *et al.*, 2014). La capital social del agroecosistema amplía la frontera del modelo y permite una reflexión sobre las conexiones frecuentemente omitidas entre las relaciones sociales de los agricultores y la capacidad productiva de sus fincas (Díaz y Córdoba, 2020). En los sistemas cafetaleros rusticanos bajo sombra, el manejo agroforestal es amigable con el medio ambiente (García *et al.*, 2017). Los árboles de sombra prestan importantes servicios ecosistémicos como: el secuestro de carbono, regulación del microclima, regulación de la fertilidad del suelo, reciclaje de nutrientes y reducción de la evaporación del agua del suelo son algunos de los efectos positivos más destacados sobre ambos servicios (Villarreyña *et al.*, 2020).

Algunos de los factores que favorecen los cultivos orgánicos de café en México son: la presencia de prácticas de agricultura tradicional, asociada a una importante presencia de tradiciones indígenas, mínimo uso de agroquímicos de la mayoría de los productores, las formas de organización tradicional, predominio de variedades arábicas tradicionales, diversidad de suelos cafetaleros, zonas de óptima altitud y la producción bajo sombra diversa (Nájera, 2002; Escamilla, 2007). En un estudio reciente del agroecosistema cafetalero del estado de Chiapas encontraron una modificación de la diversidad y componente arbóreo; se redujo el sistema rusticano y se incrementaron los sistemas de policultivo tradicional y el sistema especializado de manera regionalizado, debido a la introducción de variedades mejoradas tolerantes a la roya (*Hemileia vastatrix*) (Escamilla *et al.*, 2021).

2.4. Los Abonos orgánicos

Los abonos orgánicos han sido catalogados principalmente como enmiendas o mejoradores de suelo (Castro *et al.*, 2009). Son un conjunto de materiales biodegradables ricos en bacterias nitrificantes y microorganismos activos que permiten una mayor disponibilidad de los nutrientes que garantiza la fertilidad permanente del suelo para los cultivos (Martínez, 1996). La aplicación de enmiendas orgánicas es una práctica que se hace regularmente en sistemas de cultivos, con el fin de mejorar propiedades físicas y químicas del suelo y aportar nutrientes como el nitrógeno (N) (Monsalve *et al.*, 2017).

En el caso particular la lombricomposta, el proceso consiste en la biooxidación y estabilización de los sustratos orgánicos, la descomposición es realizada por la acción conjunta de lombrices y microorganismos, que lo convierten en un material humificado y mineralizado (Martínez, 1996). La lombriz roja californiana (*Eisenia foetida*) es la especie de lombriz más utilizada en el proceso de lombricompostaje, el crecimiento y reproducción de la lombriz están directamente relacionados con el tipo de sustrato en el cual vive y se desarrolla (Durán y Henríquez, 2009).

2.5. Definición de fase de desarrollo vegetativo del cafeto

Según Segura (2013) el término desarrollo se refiere como: “El conjunto de cambios graduales y progresivos en tamaño (crecimiento), estructura y función (diferenciación) que sucede en la etapa fenológica de una planta” y el crecimiento se define como: “Un incremento irreversible en tamaño

o volumen de la planta”, es decir, el crecimiento de las plantas se produce a través del alargamiento o expansión celular. El crecimiento se puede medirse como longitud, masa o peso (Bidwell, 1993).

“En el caso de especies perennes y arbustivas como el cafeto, la definición de la fase vegetativa es bastante compleja, debido a que el crecimiento vegetativo, por ejemplo, la formación de nudos y hojas y la generación de nuevas raíces, ocurre durante toda la vida de la planta y en la mayor parte del tiempo está intercalado con el crecimiento reproductivo. De acuerdo con la forma como se desarrolla la planta de café en Colombia, puede considerarse que el desarrollo vegetativo, es decir, la formación de raíces, ramas, nudos y hojas comprende tres etapas: germinación a trasplante (2 meses), almácigo (5-6 meses) y siembra definitiva a floración (11 meses). Hasta este momento, se considera netamente vegetativa y de ahí en adelante, las fases de crecimiento vegetativo y reproductivo transcurren simultáneamente durante el resto de vida de la planta” (Arcila y Farfán, 2007).

En las plántulas en general, el suministro de nutrientes proviene de los compuestos de reserva presentes en la semilla. Sin embargo, al comienzo del estado vegetativo, la fuente de material orgánico pasa de estar de la semilla a estar en las hojas maduras y éstas exportan cerca de 50% de los fotosintatos a las hojas jóvenes (Mengel & Kirkby, 2000).

2.6. Nutrientes esenciales en las plantas

Los nutrientes esenciales requeridos por las plantas son de naturaleza inorgánica (Cuadro 2). Los nutrientes vegetales pueden dividirse en macronutrientes y micronutrientes. Los macronutrientes son necesarios en cantidades relativamente más altas que los micronutrientes. Se puede definir como macronutrientes los siguientes elementos: carbono (C), hidrógeno (H), oxígeno (O), nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg) y azufre (S). El C y los micronutrientes son: hierro (Fe), manganeso (Mn), cobre (Cu), zinc (Zn), molibdeno (Mo) y boro (B) (Mengel & Kirkby, 2000).

Cuadro 2. Nutrientes esenciales y sus funciones en la planta.

Elemento	Componente orgánico
N	El nitrógeno es constituyente de los aminoácidos, las amidas, las proteínas, los ácidos nucleicos, las coenzimas, las hexoseaminas y la clorofila.
P	El fósforo es componente de los azúcares, fosfatos, ácidos nucleicos, nucleótidos, coenzimas, fosfolípidos, además de ser componentes de la energía química orgánica en forma de ATP. Juega un papel clave en la transferencia de energía.
K	El potasio es constituyente del protoplasma de las células como ion libre, es regulador osmótico celular, activador o cofactor de muchas enzimas incluyendo la ATPasa, participa en el transporte de carbohidratos, juega un papel importante en la apertura y cierre de estomas (células guarda), participa en el transporte del Cl, H ⁺ , Ca ²⁺ .
S	El azufre es componente de las moléculas de cisteína, cistina, metionina y también algunas proteínas.
Ca	El calcio es un constituyente de la lámina media de la pared celular en forma de Ca-pectato. Es cofactor de algunas coenzimas involucradas en la hidrólisis del ATP y de los fosfolípidos. Es un componente esencial de la amilasa de ciertas bacterias, hongos y animales. La deficiencia de calcio se manifiesta en un incremento en la fragilidad de los cromosomas.
Mg	El magnesio es requerido por una cantidad de enzimas involucradas en la transferencia de fosfato. Es un constituyente de la molécula de clorofila.
Mn	El manganeso participa en la actividad de algunas enzimas tales como las deshidrogenasas, descarboxilasas, kinasas, oxidasas y peroxidasas. Forma parte de la enzima que realiza la fotólisis en el lumen del tilacoide.
Fe	El hierro es constituyente de los citocromos que tienen como función la transferencia de electrones. Forma parte de algunas proteínas involucradas en la fotosíntesis, participa en la fijación de N ₂ y del enlace respiratorio deshidrogenasa.
Cu	El cobre es componente esencial del ácido ascórbico oxidasa, tirosinasa, lacasa, monoamina oxidasa, uricasa y galactosa oxidasa. La deficiencia en algunas especies vegetales se manifiesta en una disminución en la actividad del citocromo fotooxidasa.

Zn	El zinc es un constituyente esencial del alcohol deshidrogenasa, deshidrogenasa glutámica, deshidrogenasa láctica, anhidrasa carbónica, fosfatasa alcalina, carboxipeptidasa B y otras enzimas.
B	El boro participa en el transporte de carbohidratos. Forma parte de boratos complejos con algunos carbohidratos.

Tomado de (Velasco *et al.*, 2011)

2.7. Propiedades químicas y fisicoquímicas del suelo

2.7.1. Reacción del suelo o acidez (pH)

El pH es una medida de la acidez del suelo. El pH representa la concentración de iones (H^+) en el suelo, en solución acuosa. El valor del pH se maneja en una escala de 1 a 14; siendo el 7 un valor neutro, aquellos que tienen pH menor a 6 son ácidos y alcalinos arriba de 8 (Alexandre *et al.*, 2017). En suelos minerales con pH inferior a 5.5 gran proporción de los sitios de intercambio de las arcillas está ocupado por aluminio, que reemplaza otros cationes como el Mg^{2+} y el Ca^{2+} y simultáneamente se adsorbe a los fosfatos (Casierra y Aguilar, 2007). Las condiciones de acidez en el suelo, al afectar el crecimiento normal de las raíces; limita la absorción de nutrientes, el desarrollo de la parte aérea de las plantas y el rendimiento de grano café (López *et al.*, 2018).

2.7.2. Capacidad de intercambio catiónico (CIC)

La CIC indica la capacidad del suelo para retener o intercambiar nutrientes. En la solución de suelos se disuelven los nutrientes clasificados en cationes (potasio (K^+), calcio (Ca^{+}), magnesio (Mg^{2+}), amonio (NH_4^+), sodio (Na^+), hidrógeno (H^+) y los metales) que tienen cargas positivas y aniones (fosfato (PO_4^3), carbonato (CO_3^{2-}), nitrato (NO_3^-), cloruro (Cl^-) y sulfato (SO_4^{2-}), entre otros) cuyas cargas son negativas. Existen cationes básicos (sodio, calcio, magnesio, potasio), llamados bases intercambiables y ácidos (hidrógeno y aluminio (Al^{3+})). El complejo arcilla-humus está cargado negativamente y en esa matriz se fijan los cationes cargados positivamente (Alexandre *et al.*, 2017). En suelos ligeramente ácidos, neutros o alcalinos ($pH > 6.0$), los cationes básicos o bases intercambiables son el calcio, magnesio, sodio y potasio, que actúan como nutrientes. Sin embargo, la cantidad de cationes ácidos (hidrógeno y aluminio, cuya suma se denomina acidez intercambiable) $pH < 5.5$, es mayor, afectando al sistema radicular (Snoeck & Lambot, 2004).

2.7.3. La materia orgánica (MO)

La MO es la fracción orgánica que incluye residuos (frescos o en estado de descomposición) de plantas, animales y el humus relativamente estable (Alexandre *et al.*, 2017). Los suelos agrícolas en México son generalmente pobres en materia orgánica, un suelo con 1.0% de materia orgánica solo aporta 17.4 kg de N por ha, mientras que uno que es rico en esta (4%) puede contribuir con hasta 69.6 kg de N por ha (Trinidad y Velasco, 2016).

2.8. Requerimientos agroecológicos del cultivo de café

Según en las revisiones de Díaz *et al.* (2013) se enlistan los datos de las variables climáticas óptimas en el cultivo de café (*Coffea arabica* L.) (Cuadro 3).

Cuadro 3. Requerimientos edafoclimáticos para el cultivo de café (*Coffea arabica* L.).

Elemento y/o factor	Valores
Temperatura promedio anual	17-23 °C (Castillo <i>et al.</i> , 1997)
Temperatura promedio mensual	19-22 °C (Castillo <i>et al.</i> , 1997)
Temperatura mínima	16 °C (Castillo <i>et al.</i> , 1997)
Temperatura máxima	25 °C (Castillo <i>et al.</i> , 1997)
Altitud	600-1500 msnm (Contreras, 2000)
Precipitaciones anuales	1200-2000 mm (Arnold, 2001)
pH	5.5-6.5 (Alexandre <i>et al.</i> , 2017)
Pendiente	< 5% (Zetina <i>et al.</i> , 2013)
Materia orgánica	> 2% (Zetina <i>et al.</i> , 2013)
Textura de suelo	Suelos arcillosos, limo-arcillosos o arcillo-limosos (Destroix & Wintgens, 2004).

2.9. Requerimientos nutricionales

La fertilidad es la cantidad existente de nutrientes en el suelo a ser absorbida por las plantas y es quizá el factor más determinante de su crecimiento y productividad (Cuadro 4 y 5); por lo tanto, los nutrientes esenciales deben estar disponibles para la planta en épocas y cantidad adecuada para atender la demanda del cafeto (Alexandre *et al.*, 2017).

En la etapa de desarrollo vegetativo, hay una alta demanda de nitrógeno y fósforo, pero depende de las condiciones de fertilidad del suelo (Arcila y Farfán, 2007). En ocasiones, será necesaria la

aplicación de enmiendas orgánicas e inorgánicas para corregir los problemas acidez y acondicionar el suelo (Sadeghian, 2008).

El abastecimiento de nutrientes de las plantas se da principalmente desde el suelo a la raíz de las plantas; la aplicación foliar es particularmente útil en condiciones en las que la absorción de nutrientes desde el suelo está restringida, las hojas solo son capaces de absorber cantidades pequeñas de nutrientes en relación con las necesidades de las plantas (Mengel & Kirkby, 2000).

Cuadro 4. Rangos óptimos de nutrientes del suelo para el cultivo café (*Coffea arabica* L.).

Elemento	Cantidad	Unidad
P	10-30	mg kg ⁻¹
K	0.2	mEq/100 g suelo
Ca	4-20	mEq/100 g suelo
Mg	1-10	mEq/100 g suelo
Al	0.3	mEq/100 g suelo
Fe	10-50	mg kg ⁻¹
Cu	1-20	mg kg ⁻¹
Zn	3-15	mg kg ⁻¹
Mn	5-50	mg kg ⁻¹
Relación de cationes intercambiables		
Ca + Mg + K	5.0-10.0	mEq/100 g suelo
Mg: K	2.5-15.0	
Ca: Mg	2.0-5.0	
Ca + Mg/K	10.0-40.0	
Ca: K	5.0-25.0	

Tomado de (Monge, 1999)

Cuadro 5. Rangos óptimos de contenido de nutriente en las hojas de café (*Coffea arabica* L.).

Elemento	Cantidad	Unidad
N	2.5-3.5	%
P	0.15-0.35	%
K	2.0-3.0	%
Ca	0.8-1.6	%
Mg	0.3-0.5	%
S	0.25-0.5	%
Mn	50-300	mg kg ⁻¹
B	25-75	mg kg ⁻¹
Fe	90-300	mg kg ⁻¹
Zn	15-200	mg kg ⁻¹
Cu	10-50	mg kg ⁻¹
Al	55-65	mg kg ⁻¹

Tomado de (Monge, 1999)

III.OBJETIVOS E HIPÓTESIS

3.1. Hipótesis

Los diferentes niveles de lombricomposta aplicados al suelo se expresan en la transición desarrollo vegetativo-reproductivo de los cafetos y en las características nutricionales del suelo.

3.1.1. Objetivo general

Evaluar el efecto de abono orgánico aplicado al suelo como fuente principal en cafetos en la fase de desarrollo vegetativo y primer ensayo de producción.

3.1.2. Objetivos específicos

1. Comparar el efecto de distintos niveles de lombricomposta aplicado al suelo en cafetos en sus primeras etapas de desarrollo.
2. Describir las características fisicoquímicas del suelo tratados con lombricomposta.
3. Describir las características de los contenidos foliares de los cafetos tratados con lombricomposta.

IV.MATERIALES Y MÉTODOS

4.1. Ubicación geográfica

La presente investigación se realizó en el municipio de Simojovel, Chiapas (Figura 2). Ubicado en la región fisiográfica Sierras del Norte de Chiapas entre los paralelos 17°04' y 17°14' de Latitud Norte; los meridianos 92°26' y 92°48' de Longitud Oeste; altitud entre 200 y 2 200 msnm. Colinda al norte con los municipios de Pueblo Nuevo Solistahuacán, Huitiupán, Sabanilla y Tila; al este con los municipios de Tila, Yajalón y Pantelhó; al sur con los municipios de Pantelhó, Chalchihuitán, El Bosque y Jitotol; al oeste con los municipios de Jitotol, San Andrés Duraznal y Pueblo Nuevo Solistahuacán. El suelo tiene un origen de roca sedimentaria: caliza (47.67%), lutita-arenisca (34.95%) y arenisca (17.38%) (INEGI, 2010).

Los suelos dominantes son Luvisol (47.47%), Phaeozem (8.63%) y Leptosol (0.12%). Tiene un rango de temperatura de 16-26 °C, precipitación de 1500-2500 mm anuales con clima Cálido

húmedo con abundantes lluvias en verano (47.34%), cálido subhúmedo con lluvias en verano (25.31%), semicálido húmedo con lluvias todo el año (25.07%) y templado húmedo con lluvias todo el año (2.28%) (INEGI, 2010).

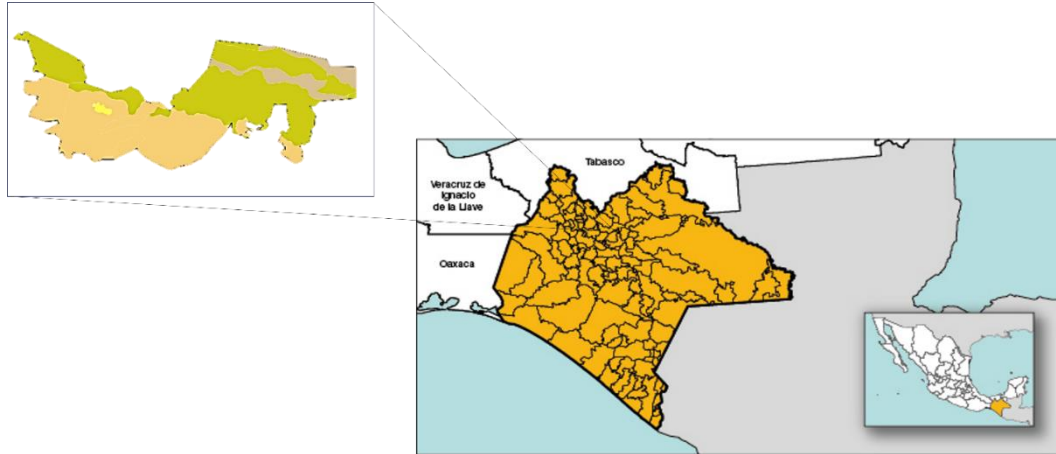


Figura 2. Ubicación geográfica del municipio de Simojovel, Chiapas
Adaptado de (INEGI, 2010)

4.1.1. Ubicación de la parcela experimental

La parcela experimental se estableció en la comunidad de Yuquín, municipio de Simojovel, Chiapas entre las coordenadas $17^{\circ}5' 11.36''$ LN y $92^{\circ}44'9.00''$ LW a una altitud de 1331 msnm (Figura 3).

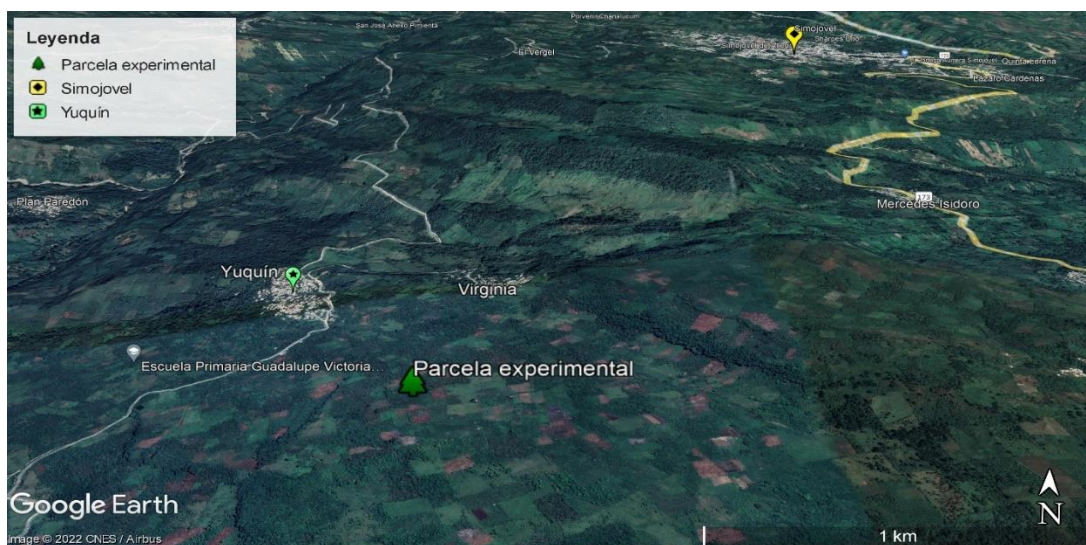


Figura 3. Ubicación de la parcela experimental en Yuquín, Simojovel, Chiapas.
Elaboración propia

4.2. Establecimiento de la parcela experimental

4.2.1. Material vegetal

La variedad Colombia es un cultivar de café compuesto de las mejores progenies cuyos progenitores son el híbrido de Timor que confiere resistencia genética a la roya anaranjada (*Hemileia vastatrix*) y Caturra, portadora de los genes de productividad y porte bajo (Zamarripa y Escamilla, 2016). En los años noventa se introdujeron materiales con nombre de Colombia, sin embargo, se desconoce si se trata del cultivar completo o solo algunas líneas de la mezcla; en México se conocen dos variantes: Colombia de Brote Café y Colombia Brote Verde (Escamilla *et al.*, 2016).

El 25 de junio de 2020 se estableció el cultivo de café (*Coffea arabica* L) de variedad Colombia en trazos de curvas de nivel con marco topológico rectangular de 2 m entre surcos y 1.5 m entre plantas que equivale a una densidad 3333 plantas ha⁻¹. El porcentaje de sombra se determinó mediante un transecto dentro de la parcela para el registro de punto de luz y sombra con la ayuda de un densitómetro; el resultado fue de 60% de sombra. La especie de sombra corresponde al chalahuite (*Inga vera* Willd) de la familia de las fabáceas.

4.2.2. Diseño experimental

El diseño experimental fue bloques completamente al azar de cuatro tratamientos y seis repeticiones por tratamiento. El bloqueo se realizó por alturas de la planta y diámetro de tallo relativamente homogéneos (Figura 4).

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	16	17	18	19	20	21	22	23	24			
48	47	46	45	44	43	42	41	40	39	38	37	36	35	34	33	32	31	30	29	28	27	26	25		
49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72		
96	95	94	93	92	91	90	89	88	87	86	85	84	83	82	81	80	79	78	77	76	75	74	73		
97	98	99	100	101	102	103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118	119	120		
146	145	144	143	142	141	140	139	138	137	136	135	134	133	132	131	130	129	128	127	126	125	124	123	122	121
147	148	149	150	151	152	153	154	155	156	157	158	159	160	161	162	163	164	165	166	167	168	169	170	171	172
195	194	193	192	191	190	189	188	187	186	185	184	183	182	181	180	179	178	177	176	175	174	173	172	171	170
196	197	198	199	200	201	202	203	204	205	206	207	208	209	210	211	212	213	214	215	216	217	218	219	220	221
245	244	243	242	241	240	239	238	237	236	235	234	233	232	231	230	229	228	227	226	225	224	223	222	221	220
246	247	248	249	250	251	252	253	254	255	256	257	258	259	260	261	262	263	264	265	266	267	268	269	270	271
295	294	293	292	291	290	289	288	287	286	285	284	283	282	281	280	279	278	277	276	275	274	273	272	271	270
296	297	298	299	300	301	302	303	304	305	306	307	308	309	310	311	312	313	314	315	316	317	318	319	320	321
345	344	343	342	341	340	339	338	337	336	335	334	333	332	331	330	329	328	327	326	325	324	323	322	321	320
346	347	348	349	350	351	352	353	354	355	356	357	358	359	360	361	362	363	364	365	366	367	368	369	370	371
395	394	393	392	391	390	389	388	387	386	385	384	383	382	381	380	379	378	377	376	375	374	373	372	371	370
396	397	398	399	400	401	402	403	404	405	406	407	408	409	410	411	412	413	414	415	416	417	418	419	420	421
445	444	443	442	441	440	439	438	437	436	435	434	433	432	431	430	429	428	427	426	425	424	423	422	421	420
446	447	448	449	450	451	452	453	454	455	456	457	458	459	460	461	462	463	464	465	466	467	468	469	470	471

Figura 4. Distribución de plantas dentro de la parcela experimental.

Turquesa = Testigo (T0); amarillo = 1 kg de lombricomposta (T1); azul = 2 kg de lombricomposta (T2); verde = 3 kg de lombricomposta (T3)

4.2.3. Muestreo de suelo

Se realizó un muestreo de suelo inicial antes de la aplicación de tratamientos dentro de la parcela experimental, con la ayuda de una pala recta se tomó una muestra a una profundidad de 30 cm en la zona de goteo de las plantas, se utilizó el método de zigzag para la distribución de los puntos de muestro. Se colectaron 15 submuestras, se mezclaron y se obtuvo una muestra compuesta.

Al final de la fase experimental, se realizó un muestreo final. Se tomaron muestreos de suelo más puntuales, de acuerdo con el nivel de tratamiento (lombricomposta) aplicado (T0, T1, T2 y T3). Las muestras se colectaron en la zona de goteo de las plantas y en total se obtuvieron cuatro muestras compuestas que incluye el testigo absoluto.

4.2.4. Muestreo foliar

Se realizó un muestreo foliar inicial antes de la aplicación de tratamientos y al finalizar el experimento se tomaron muestras foliares de acuerdo con el nivel de tratamiento (lombricomposta) aplicado (T0, T1, T2 y T3). Se tomaron hojas maduras en el tercer y/o cuarto pares de hojas de la bandola y tercio medio de la planta. Las hojas colectadas se metieron dentro de bolsas de papel estraza y bolsa de plástico. Las muestras de suelo y foliar se enviaron al laboratorio de análisis de suelos de Fypa ® en Fortín de las Flores, Veracruz.

4.3. Métodos y procedimientos de análisis de suelo, foliar y lombricomposta

Los resultados de análisis de laboratorio indican que se emplearon métodos y procedimientos de análisis de suelo, foliar y lombricomposta, que se describe a continuación:

Análisis de suelos. La determinación de pH se realizó con un potenciómetro en una relación 1:2. La conductividad eléctrica se determinó con un conductímetro. La materia orgánica por el método de Walkley- Black. El fósforo disponible según el pH por el método de Bray y determinación por UV-VIS. Los elementos (Ca, Mg, Na, K) se extrajeron con acetato de amonio 1N pH 7 y su determinación por absorción atómica. Los microelementos (Fe, Cu, Zn y Mn) se extrajeron por el método de DTPA y se determinaron por absorción atómica. El boro se extrajo con agua caliente y se determinó por UV-VIS empleando curcumina. La textura por el método de Bouyoucos. La densidad aparente por el método de la parafina.

Análisis foliar. El nitrógeno se determinó por el método Micro Kjeldahl. Para el análisis de las cenizas se disolvieron los elementos (Ca, Mg, K, Fe, Cu Zn, Mn) se determinaron por absorción atómica. El fósforo y boro se determinaron por UV-VIS.

Análisis de compostas. Para el análisis químico de la lombricomposta se emplearon los métodos y procedimientos de la NMX-FF-109-SCFI-2007 (Secretaría de economía, 2007)(Cuadro 6).

Cuadro 6. Resultado del análisis de la lombricomposta comercial aplicada a las plantas.

Parámetros	Resultados	Unidades
Humedad	34.53	%
pH	6.69	--
CE	1.365	dS m ⁻¹
Cenizas	57.45	%
Materia Orgánica	42.55	%
Carbono total	24.681	%
Nitrógeno total	1.03	%
Relación C: N	23.96	--
Ca (Cao)	15.942	%
Mg (Mg O)	0.599	%
Sodio (Na2O)	0.057	%
Potasio (K2O)	0.35	%
Fósforo (P2O5)	4.499	%
Hierro (Fe)	0.2585	%
Cobre (Cu)	0.0054	%
Zinc (Zn)	0.014	%
Manganeso (Mn)	0.0731	%

4.4. Aplicación de tratamientos (lombricomposta)

Se aplicaron tres niveles de lombricomposta que corresponde a los tratamientos y se aplicó por planta: T1, T2 y T3 con 1kg de lombricomposta, 2 kg de lombricomposta y 3 kg de lombricomposta, respectivamente. Y un testigo T0 sin la aplicación de lombricomposta.

La aplicación del tratamiento (lombricomposta) a los cafetos se realizó el 07 de octubre de 2021 con una edad de 15 meses, una sola vez. Previo a la aplicación de tratamientos, se realizó una actividad denominada “cajeteo” que consiste en eliminar en forma manual las hierbas o arvenses que se encuentran alrededor de la base de la planta. La lombricomposta se aplicó desde la base de la planta hasta la zona de goteo de la planta y se tapó con una capa de hojarasca.

4.5. Manejo de la parcela experimental

4.5.1. Control de arvenses

Se realizaron actividades de control de arvenses cada cuatro meses con la ayuda de una desbrozadora, incluyendo ‘cajeteos’ con machete.

4.5.2. Aplicación de cal dolomita

Después de dos meses de aplicación de lombricomposta, se aplicó cal dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) con nombre comercial Korrektor® con la fórmula Cao 26% y MgO 16% con 114% de Poder Relativo de Neutralización Total (PRNT) con una dosis total de 250 g planta⁻¹. Previo a la aplicación de la cal dolomita se realizó “cajeteos”. Se realizaron dos aplicaciones de cal dolomita, con dos meses entre aplicación; la primera se realizó el 12 de diciembre de 2021 con una dosis de 150 g planta⁻¹ y la segunda se realizó el 08 de febrero de 2021 con una cantidad de 100 g planta⁻¹, durante cada aplicación, se procuró presencia de humedad en el suelo.

4.5.3. Aplicación de caldo mineral

Se realizó la preparación del caldo visosa adaptado para la cafecultura orgánica (Cuadro 7).

Cuadro 7. Cantidad de ingredientes para preparar 100 L caldo visosa.

Ingredientes	Cantidad
Agua	100 L
Sulfato de cobre (Cu SO_4)	500 g
Sulfato de zinc (Zn SO_4)	600 g
Sulfato de magnesio (Mg SO_4)	400 g
Ácido bórico ($\text{H}_3 \text{BO}_3$)	400 g
Cal hidratada ($\text{Ca}(\text{OH})_2$)	500 g

Tomado de (Restrepo, 2007)

El 14 de enero de 2021 se realizó la primera aplicación de caldo visosa con una proporción de 1:1 que es equivalente de 50% de agua y 50% de caldo. La aplicación se realizó con una mochila aspersora con capacidad de 20 L. La segunda aplicación de caldo visosa se realizó el 12 de febrero de 2022 con la misma proporción 1:1.

La aplicación del caldo mineral se realizó por la tarde, se asperjó el área foliar y se procuró asperjar muy bien el envés de las hojas donde se alojan las pústulas de roya (*Hemileia vastatrix*).

4.6. Registro de datos aéreos

La toma de datos se efectuó en un periodo de seis meses iniciando el octubre de 2021 y concluyendo el abril de 2022. La toma de datos de la parte aérea de la planta se realizó cada dos meses. En total se registraron cuatro tomas de datos de la parte aérea de las plantas que integran la muestra, de las siguientes variables: altura de la planta, diámetro de tallo, número total de hojas, número total de ramas plagiotrópicas y el número de frutos del primer ensayo de producción. La variable altura de las plantas se midió con un flexómetro y el diámetro del tallo con un aparato tipo vernier.

Se realizó una toma de datos inicial de la parte aérea de las plantas previo a la aplicación de tratamientos (lombricomposta) y posteriormente se realizaron cada dos meses. A los 21 meses de edad de las plantas, se realizó la última toma de datos aéreos.

4.7. Análisis de resultados

Las variables evaluadas: altura de la planta (cm), diámetro de tallo (cm), número total de hojas (unidades), número total de ramas (unidades) y el número de frutos del primer ensayo de producción (unidades), se sometieron a un análisis de varianza y pruebas de Tukey con el software libre RStudio y se realizó la caracterización de los resultados del análisis de suelos y foliar.

V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. Características físicas del suelo

El suelo de la parcela experimental presentó propiedades físicas de clase textural franco arenoso, con contenidos de arenas mayores al 70% en los cuatro niveles de aplicación de tratamientos de lombricomposta. El porcentaje de arena, limo y arcilla se puede visualizar en el Cuadro 8. Para el establecimiento del cafetal, se sugieren suelos arcillosos, limo-arcillosos o arcillo-limosos, y en menor medida, arenas arcillo limosas y migajones o suelos francos (Destroix & Wintgens, 2004).

Los valores encontrados de la densidad aparente (DA) son mayores a 1.4 g cm^{-3} en los cuatro tratamientos (Cuadro 8). La DA óptima para el desarrollo del café en la fase vegetativa temprana depende del tipo de suelo. Salamanca *et al.* (2004) encontraron que, en dos unidades de suelo de

Colombia, la DA óptima es entre 0.64 y 0.67 g cm⁻³ mientras que en la otra es a 1.20 g cm⁻³. El incremento de la DA afectó de manera negativa el crecimiento del café.

Cuadro 8. Características físicas del suelo a la aplicación de los cuatro tratamientos de lombricomposta.

Textura	ASI	Niveles de tratamientos de lombricomposta			
		T0	T1	T2	T3
Arena (%)	69.04	71.48	70.12	77.76	73.48
Limo (%)	18	11.64	10.60	5.64	8.64
Arcilla (%)	12.96	16.88	19.24	16.60	17.96
DA (g cm ⁻³)	1.74	1.71	1.51	1.46	1.64
CT	Franco arenoso	Franco arenoso	Franco arenoso	Franco arenoso	Franco arenoso

ASI = Análisis de suelo inicial; T0 = Testigo; T1 = Tratamiento de 1 kg de lombricomposta; T2 = Tratamiento de 2 kg de lombricomposta; T3 = Tratamiento de 3 kg de lombricomposta; DA = Densidad Aparente; CT = Clase Textural

5.2. Características químicas del suelo

La aplicación de los tratamientos de lombricomposta no afectó de manera significativa al pH (5.06) inicial del suelo (Cuadro 9). Dicho valor de pH coincide con un estudio realizado en la Reserva de la Biósfera El Triunfo, en Chiapas donde presentó un valor promedio de 5.08 (López *et al.*, 2016). El tratamiento de T3 (3kg de lombricomposta) mostró el pH más alto (5.32) pero se mantuvo en la categoría moderadamente ácido. Los rangos de pH entre 5.0 y 5.5 se considera adecuado para el crecimiento de café (Sadeghian, 2013). En otras fuentes mencionan que las mejores condiciones se obtienen a pH 5.5-6.5 aunque también es posible establecer el cafetal a pH de 5.0; sin embargo, con un pH menor de 4.5 los cafetos presentan disturbios fisiológicos y deficiencias de macronutrientes debido a las altas concentraciones de iones hidrógeno y de aluminio (Alexandre *et al.*, 2017). El efecto inicial de la toxicidad por aluminio en las plantas es la inhibición del crecimiento radicular, la sensibilidad a este elemento ocurre en el ápice radicular (Casierra y Aguilar, 2007).

La materia orgánica (MO) del suelo es alta (Cuadro 9). La MO que poseen los suelos proviene de la hojarasca producida por las plantas de café y de los árboles de sombra (López *et al.*, 2016). El rango de valores encontrados fue de 5.15-5.32 para los cuatro tratamientos aplicados. Mientras que en el análisis de suelo inicial (ASI) fue de 6.04. El contenido de MO recomendable para el cultivo de café debe de ser mayor a 2%, con esta característica confiere la ventaja de una mayor

actividad microbiana y una mayor reserva de nutrientes esenciales (nitrógeno, fósforo y azufre) para la nutrición de los cafetos (Zetina *et al.*, 2013).

Cuadro 9. Características químicas del suelo a la aplicación de los cuatro tratamientos de lombricomposta a las plantas.

Parámetros	ASI	Niveles de tratamientos de lombricomposta			
		T0	T1	T2	T3
pH	5.06	5.25	5.24	5.22	5.32
MO (%)	6.04*****	5.15*****	5.58*****	5.66*****	5.83*****
NT (%)	0.172*****	0.171*****	0.178*****	0.181*****	0.880*****
PA (mg kg ⁻¹)	0.76*	0.83*	2.13*	2.49*	5.79**
Ca ++ (mg kg ⁻¹)	880.60***	989***	1190.40***	1337.20***	1594.20****
Mg ++ (mg kg ⁻¹)	118.46***	116.39***	156.89***	176.05***	258.40****
Na + (mg kg ⁻¹)	21.16*	7.13*	6.67*	7.82*	7.82*
K + (mg kg ⁻¹)	291.72*****	201.63*****	213.33*****	192.27****	236.73*****
CIC (cmol kg ⁻¹)	15.55****	13.60**	14.61**	15.32****	17.16****
Fe (mg kg ⁻¹)	53.40*****	41.92*****	38.14*****	44.02*****	43.96*****
Cu (mg kg ⁻¹)	0.18****	1.36*****	1.72*****	1.58*****	2.16*****
Zn (mg kg ⁻¹)	0.92***	0.34**	0.58**	0.58**	0.88***
Mn (mg kg ⁻¹)	10.15****	11.97****	11.15****	14.51*****	15.87*****
B (mg kg ⁻¹)	0.24*	0.92****	0.88****	0.75****	0.98****

* = Muy bajo; ** = Bajo; *** = Moderadamente bajo; **** = Medio; ***** = Moderadamente Alto; **** = Alto; MO = Materia Orgánica; NT = Nitrógeno Total; PA = Fósforo asimilable; ASI = Análisis de Suelos Inicial; T0 = Testigo; T1 = Tratamiento de 1 kg de lombricomposta; T2 = Tratamiento de 2 kg de lombricomposta; T3 = Tratamiento de 3 kg de lombricomposta

5.2.1. Contenido de macronutrientes (N, P, K, Ca y Mg)

El contenido de nitrógeno total (NT) del análisis de suelo inicial (ASI) y los tratamientos T0, T1 y T2 presentaron valores similares con 0.172%, 0.171%, 0.178% y 0.178% respectivamente. El tratamiento T3 presentó el valor más alto de NT con 0.880% (Cuadro 9). INMECAFÉ-NESTLÉ (1990) menciona que cuando el contenido de N total es mayor de 0.8%, el suelo no necesita fertilización nitrogenada. La asociación café-leguminosa en cafetales, la fijación biológica y la caída de hojarasca podrían ser dos factores importantes en el mantenimiento del nitrógeno en el suelo (Mogollón *et al.*, 1997).

La aplicación de los tratamientos al suelo, no afectó positivamente al contenido de fósforo asimilable (PA) del suelo. Los valores PA del suelo por la aplicación de tratamientos T0, T1, T2 y T3 fueron 0.83 mg kg⁻¹, 2.13 mg kg⁻¹ y 2.49 mg kg⁻¹, 5.79 mg kg⁻¹, respectivamente. Dichos valores se consideran muy bajos y bajos contenidos de PA (Cuadro 9). Existen evidencias de respuestas favorables a la fertilización fosfórica de suelos cafetaleros de Colombia cuando los

niveles de P del suelo son menores a 11 mg kg^{-1} (Sadeghian, 2009). Para los bajos contenidos de PA en suelos con manejo orgánico es necesario la aplicación de enmiendas agrícolas como la harina de hueso y compostas para incrementar la actividad microbiana (Pool *et al.*, 1998). La estimulación del sistema radicular es fundamental ya que en las raíces del café se alojan bacterias endofíticas solubilizadoras de fósforo (Ramos *et al.*, 2021).

Los contenidos de potasio (K) en el suelo son adecuados, los del ASI, T0, T1, T2 y T3 son $291.72 \text{ mg kg}^{-1}$, $201.63 \text{ mg kg}^{-1}$, $213.33 \text{ mg kg}^{-1}$, $192.27 \text{ mg kg}^{-1}$ y $236.73 \text{ mg kg}^{-1}$, respectivamente. El T3 obtuvo el valor más alto de contenido de potasio en el suelo (Cuadro 9). Para contenidos de potasio en el suelo mayores a 200 mg dm^{-3} son considerados muy buenos, no es necesario la aplicación de K para la fase vegetativa (Alexandre *et al.*, 2017).

El contenido de calcio (Ca) en el suelo no se ve afectado por la aplicación de los tratamientos (Cuadro 9). El ASI y T0, T1 y T2 comportaron de manera similar, aunque se puede observar ligeros incrementos de acuerdo con la aplicación de los tres primeros tratamientos, pero son valores moderadamente bajo. El T3 obtuvo el valor más alto ($1594.20 \text{ mg kg}^{-1}$) y alcanzó la categoría medio, quizá por la aplicación de la cal dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) al suelo.

El contenido de magnesio (Mg) del ASI y los tratamientos T0, T1 y T2, presentaron valores de $118.46 \text{ mg kg}^{-1}$, $116.39 \text{ mg kg}^{-1}$, $156.89 \text{ mg kg}^{-1}$, que entran en la categoría de moderadamente bajo. Mientras que el T3 ($176.05 \text{ mg kg}^{-1}$) presentó el valor más alto, pero aún entra en la categoría moderadamente bajo (Cuadro 9).

5.2.2. Contenido de micronutrientes (Fe, Mn, Cu, Zn y B)

Se observan altas concentraciones de hierro (Fe). Los tratamientos T0, T1, T2 y T3 presentan valores de Fe de 41.92 mg kg^{-1} , 38.14 mg kg^{-1} , 44.02 mg kg^{-1} y 43.96 mg kg^{-1} , respectivamente (Cuadro 9). Rosas *et al.* (2008) encontraron altas concentraciones de Fe en los estados de Chiapas (28.96 mg kg^{-1}) y Puebla (40.85 mg kg^{-1}). López *et al.* (2016) encontraron valores promedios muy altos de hierro (74.26 mg kg^{-1}) suelos cafetaleros de la Reserva de la Biósfera El Triunfo, en Chiapas. La alta disponibilidad del Fe puede estar estrechamente relacionado por las condiciones de pH del suelo.

El contenido de manganeso (Mn) de los tratamientos T0, T1, T2 y T3 son medios y moderadamente alto, con valores de 11.97 mg kg⁻¹, 11.15 mg kg⁻¹, 14.51 mg kg⁻¹ y 15.87 mg kg⁻¹, respectivamente (Cuadro 9). Estudios realizados en suelos cafetaleros de la Reserva de la Biósfera El Triunfo, en Chiapas, el contenido promedio de Mn fue de 43.7 mg kg⁻¹ (López *et al.*, 2016). Rosas *et al.* (2008) encontraron contenidos más altos de Mn en Oaxaca con 50.01 mg kg⁻¹ y Guerrero con 4.65 mg kg⁻¹, más bajo. Los valores son adecuados para el desarrollo del cafeto (INMECAFÉ-NESTLÉ, 1990). Los contenidos de Mn (43.7 mg kg⁻¹), podría estar relacionada con una baja capacidad fisiológica de las plantas para absorberlo y almacenarlo (Rodríguez & Morales, 2005).

También se observan valores altos de cobre (Cu) en todos los tratamientos. Los contenidos de Cu en el T0, T1, T2 y T3 son 1.36 mg kg⁻¹, 1.72 mg kg⁻¹, 1.58 mg kg⁻¹, 2.16 mg kg⁻¹, respectivamente (Cuadro 9). Rosas *et al.* (2008) encontraron que en Puebla el promedio de Cu fue 1.36 mg kg⁻¹ y Guerrero presentó el menor contenido (0.30 mg kg⁻¹), resultados similares a los obtenidos en el presente estudio.

Los contenidos de zinc (Zn) en los tratamientos T0, T1 y T2 son bajos, con valores de 0.34 mg kg⁻¹, 0.58 mg kg⁻¹ y 0.58 mg kg⁻¹, respectivamente. El tratamiento T3 (0.88 mg kg⁻¹) obtuvo el valor más alto, que alcanzó la categoría de moderadamente bajo (Cuadro 9). Garza *et al.* (2020a) encontraron que en sistemas agroforestales de *Inga vera* (1.18 mg kg⁻¹), *Juglans pyriformis* (1.08 mg kg⁻¹) y *Erythrina poeppigiana* (1.22 mg kg⁻¹) bajos contenidos de Zn y en el sistema *Grevillea robusta* y *Erythrina poeppigiana* (0.83 mg kg⁻¹) muy bajos contenidos de Zn.

El boro (B) se comportó de manera similar en el T0, T1, T2 y T3, los valores fueron 0.92 mg kg⁻¹, 0.88 mg kg⁻¹, 0.75 mg kg⁻¹ y 0.98 mg kg⁻¹ que entran en la categoría moderadamente alto (Cuadro 9). López *et al.* (2016) encontraron que el boro es el elemento más deficiente en 84% de los cafetales de la microcuenca La Suiza, en Chiapas.

5.3. Resultados del análisis foliar

5.3.1. Contenido de macronutrientes (N, P, K, Ca y Mg)

Respecto a los macronutrientes N y P en la hoja, se observan niveles óptimos en todos los tratamientos (Cuadro 10). Los niveles óptimos de P en las hojas pueden deberse a la presencia de bacterias en la raíz del cafeto que solubilizan al fósforo (Ramos *et al.*, 2021). En la hojarasca

también albergan una gran cantidad hongos micorrícicos arbusculares que pueden estar involucrados en la transferencia de nutrientes (P) a los tejidos de la planta (Díaz *et al.*, 2021). Los microorganismos pueden ser utilizados para mejorar el aprovechamiento de la aplicación de enmiendas fosfóricas en diversos suelos (Vargas y Castro, 2019). Las bacterias fijadoras de nitrógeno y las solubilizadores de fósforo, juegan un importante papel para aumentar la absorción de nutrientes minerales en las hojas del café (Anh *et al.*, 2013). Henríquez (2005) encontró una relación inversa entre la sorción (fijación) y la desorción (liberación) de P en un suelo cafetalero andosol, ello implica que, aunque los niveles de P en el suelo son bajos, por la alta sorción del elemento, el proceso de desorción podría mantener un suplemento significativo de P.

Castro (2017) señala que la concentración de Ca, Mg y K en el tejido foliar de café está asociada con la disponibilidad de estos nutrientes en el suelo. En la presente investigación, los contenidos de potasio (K) en las hojas son bajos para los tratamientos T0 (1.936%), T1 (1.885%) y T2 (1.994%). Pero con el T3 (2.29%) alcanzó niveles óptimos en la hoja (Cuadro 10). Estudios realizados en Huatusco, Veracruz en el sistema café- café-*Inga vera* el contenido de K encontrado fue de 2.85 %. (Garza *et al.*, 2020b).

Los contenidos de calcio (Ca) y magnesio (Mg) en las hojas son óptimas para todos los tratamientos, excepto el T2 de Mg que se observa un contenido menor (0.244%) (Cuadro 10). Garza, *et al.* (2020b) encontraron niveles de Mg (0.26%-0.36%) en sistemas agroforestales de café, los valores son superiores al presente estudio. Romero (1999) encontró rangos medios de calcio y magnesio en las hojas por la aplicación de lombricomposta.

5.3.2. Contenido de micronutrientes (Fe, Cu, Zn, Mn y B)

En contenido de micronutrientes Fe, Cu, Zn, Mn y Boro presentaron contenidos foliares de la hoja altos en todos los tratamientos aplicados, esto puede estar atribuido por la aplicación de caldo visoso, por su contenido de micronutrientes (Cuadro 10). Que coincide con el estudio de (Garza-Lau *et al.* 2020) que la aplicación de micronutrientes mostró una respuesta positiva en el contenido foliar. En contraste con el estudio de Salamanca y González (2020) que sólo el B incrementó el contenido foliar en las hojas ($>40 \text{ mg kg}^{-1}$). Los contenidos altos de Fe y Mn en las hojas también pueden estar relacionado con las altas concentraciones de estos microelementos en el suelo.

Cuadro 10. Contenido de nutrientes en las hojas a la aplicación de los cuatro tratamientos de lombricomposta a las plantas.

Parámetros	AFI	Niveles de tratamientos de lombricomposta			
		T0	T1	T2	T3
Nitrógeno (%)	2.72**	2.74**	2.56**	2.720**	2.59**
Fósforo (%)	0.112*	0.122**	0.137**	0.158**	0.184**
Potasio (%)	1.813*	1.936*	1.885*	1.994*	2.029**
Calcio (%)	0.820*	1.225**	1.150**	1.087**	1.160**
Magnesio (%)	0.238*	0.271**	0.256**	0.244*	0.253**
Hierro (mg kg ⁻¹)	212.71***	212.30***	159.58***	159.4***	165.89***
Cobre (mg kg ⁻¹)	21.50**	80.50***	106.25***	126.56***	120.62***
Zinc (mg kg ⁻¹)	7.81*	58.59***	102.10***	124.00***	116.60***
Manganeso (mg kg ⁻¹)	108.80**	191.10**	217.40**	179.65**	227.80**
Boro (mg kg ⁻¹)	28.66*	79.18***	86.76***	83.13***	87.42***

AFI = Análisis foliar inicial; * = Bajo; ** = Óptimo; *** = Alto; T0 = Testigo; T1 = Tratamiento de 1 kg de lombricomposta; T2 = Tratamiento de 2 kg de lombricomposta; T3 = Tratamiento de 3 kg de lombricomposta

5.4. Análisis estadístico de las variables

Las variables medidas en campo son: altura de la planta, diámetro de tallo, total de hojas, total de ramas y conteo de frutos.

Los niveles de lombricomposta aplicados no mostraron diferencias estadísticas significativas (Tukey, $P \leq 0.05$) en las variables altura de la planta, diámetro de tallo, total de hojas y total de ramas (Cuadro 11). El tratamiento testigo (T0) mostró valores promedios más altos en comparación con el tratamiento de 3 kg de lombricomposta (T3) en todas las variables vegetativas. Ávila *et al.* (2010) encontraron que al aumentar las dosis de lombricomposta en mezcla con el suelo y sin la aplicación de fertilizantes fosfóricos, disminuyó el peso seco de las plantas. Posiblemente la baja respuesta de los tratamientos al crecimiento de las plantas se debe a la alta relación carbono-nitrógeno, inherente al proceso de degradación de la lombricomposta que favorece la fuerte competencia por el nitrógeno entre las plantas y los microorganismos del suelo (Jiménez *et al.*, 2012). De igual forma, las características finales de las lombricompostas pueden ser muy diferentes y están determinadas en buena parte por la naturaleza de las fuentes orgánicas utilizadas para su elaboración (Durán & Henríquez, 2007).

Cuadro 11. Análisis de varianza de las variables respuestas medidas en campo.

Tratamiento	Variables				
	Altura (cm)	DT (cm)	TH (Unidades)	TR (Unidades)	Frutos (Unidades)
T0	99.06 a	1.98 a	243 a	22 a	149 ab
T1	101.5 a	1.95 a	225 a	23 a	55 b
T2	97.25 a	1.92 a	239 a	22 a	168 ab
T3	92.6 a	1.92 a	226 a	21 a	272 a

Medias con letras iguales en las columnas no son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$); DT = diámetro de tallo; TH = número total de hojas; TR = número total de ramas

5.4.1. Altura de la planta

La variable altura de la planta no tuvo diferencia significativa (Tukey, $P \leq 0.05$) a la aplicación de los tratamientos. Ninguno de los tratamientos superó de manera significativa al testigo en cuanto a sus resultados, para el periodo de medición, que solo tuvo una duración de seis meses. El tratamiento de 3 kg de lombricomposta (T3) alcanzó una altura promedio de 92.6 cm, mientras que los tratamientos testigo (T0) y tratamiento de 1 kg de lombricomposta (T1) obtuvieron valores promedios de 99.06 cm y 101.5 cm, respectivamente (Figura 5). Aguilar *et al.* (2016) mencionan que las diferentes concentraciones de composta no afectan las primeras etapas de crecimiento del café en etapa de vivero, mientras que la lombricomposta en proporciones altas puede limitar la altura, lo cual se debe a que este último constituye un material con un proceso bioquímico avanzado, por efecto del tracto digestivo de las lombrices, y que impactan en el crecimiento de las plantas (Jiménez *et al.*, 2012). Que coincide con estudios realizados en Colombia que la lombricomposta afectó negativamente el desarrollo de las plantas, como consecuencia de una posible toxicidad generada por la descomposición incompleta del abono (Ávila *et al.*, 2010). Mientras que Canseco *et al.* (2020) obtuvieron buen crecimiento en la altura de la planta al combinar lombricomposta + guano de murciélago + *Glomus cubense* (micorriza).

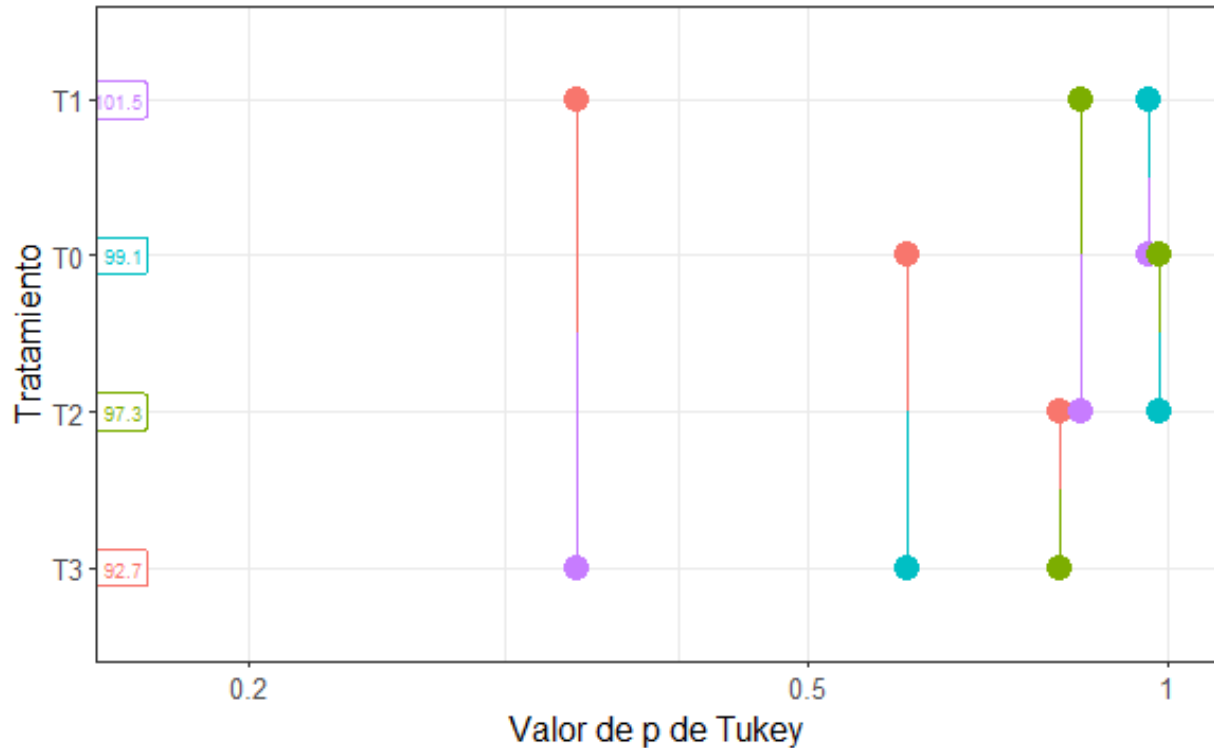


Figura 5. Gráfica del análisis de varianza de la variable altura de la planta (Tukey, $P \leq 0.05$).

5.4.2. Diámetro de tallo

El diámetro de tallo no presentó diferencia estadística (Tukey, $P \leq 0.05$) a la aplicación de los tratamientos. Ninguno de los tratamientos superó al testigo (T0). El valor del promedio más bajo fue del tratamiento de 3 kg de lombricomposta (T3) con 1.92 cm (Figura 6). Aguilar *et al.* (2016) probó diferentes proporciones de lombricomposta como sustrato en vivero de café, la proporción de 100% lombricomposta presentó menor diámetro de tallo. Canseco *et al.* (2020) probó diferentes abonos orgánicos y encontró que la aplicación de lombricomposta fue superado al testigo sin abonar.

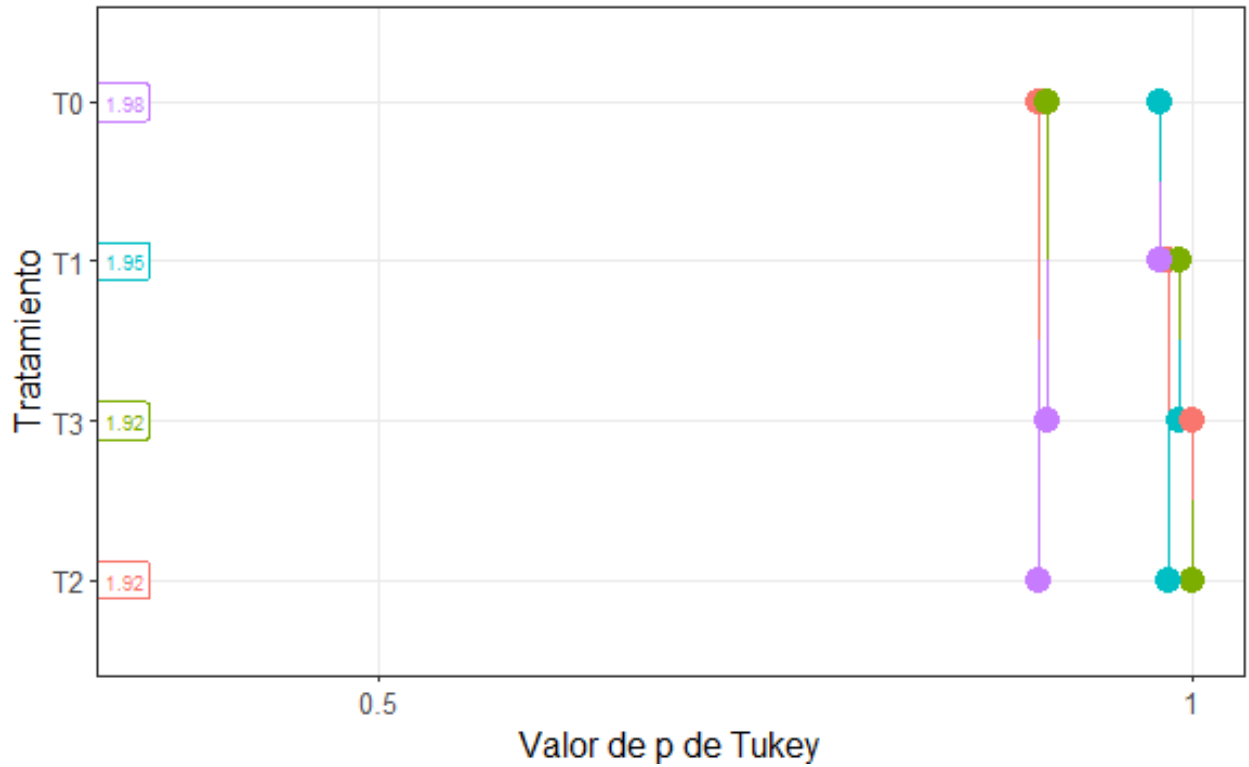


Figura 6. Gráfica del análisis de varianza de la variable diámetro de tallo (Tukey, $P \leq 0.05$).

5.4.3. Número total de hojas

La variable número total de hojas no presentó diferencias significativas (Tukey, $P \leq 0.05$) en la aplicación de los tratamientos. De igual manera, los tratamientos de 1 kg de lombricomposta T1 (225 hojas), 2 kg de lombricomposta T2 (239 hojas) y 3 kg de lombricomposta T3 (226 hojas), no superaron al testigo T0 (343 hojas) (Figura 7). El resultado del presente estudio coincide con los encontrados por (Mosquera *et al.*, 2016) donde no encontraron diferencias significativas entre los tratamientos.

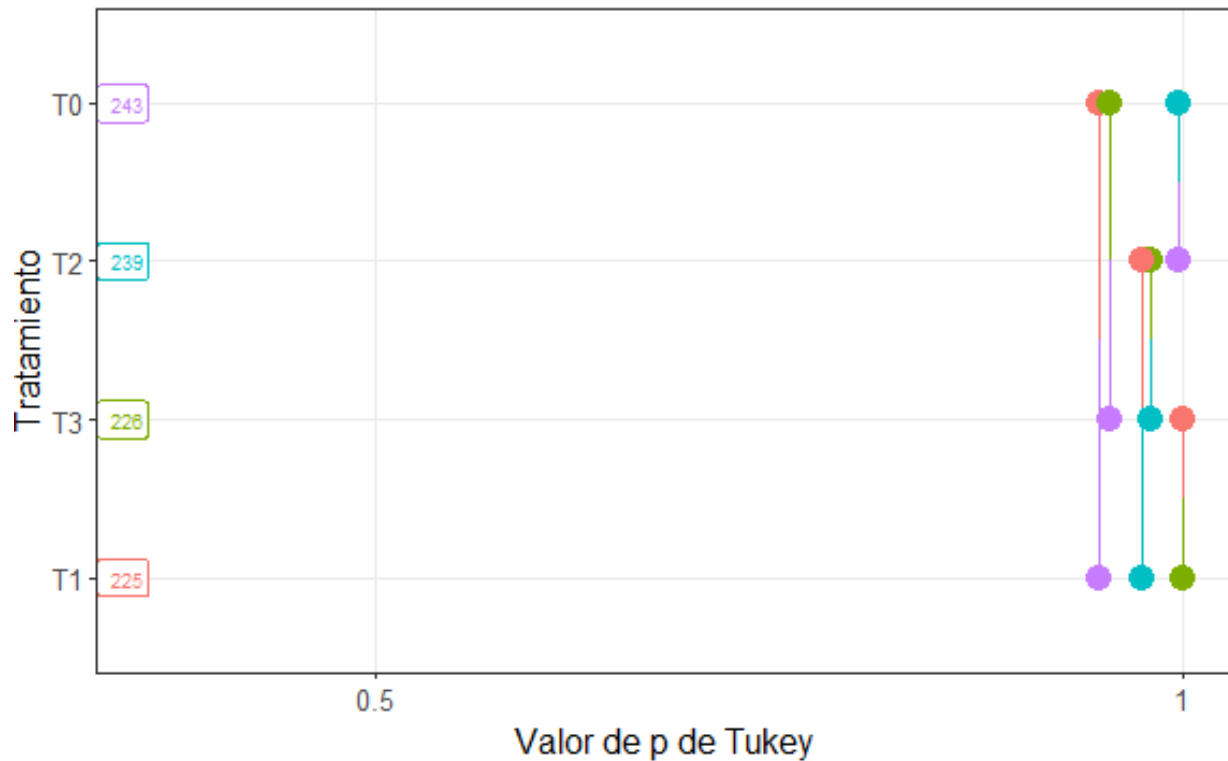


Figura 7. Gráfica del análisis de varianza de la variable número total de hojas (Tukey, $P \leq 0.05$).

5.4.4. Número total de ramas

La variable número de ramas plagiotrópicas no presentó diferencias significativas a la aplicación de los tratamientos (Tukey, $P \leq 0.05$). Ninguno de los tratamientos superó de manera significativa al testigo (T0). El tratamiento T3 de 3 kg de lombricomposta, tuvo el valor más bajo (21 ramas). Mientras que el tratamiento T1 de 1 kg de lombricomposta tuvo el valor más alto (23 ramas) (Figura 8). Cosme *et al.* (2020) aplicaron una combinación de abono orgánico y biofertilizantes en plántulas de café, aumentó el número de ramas por planta.

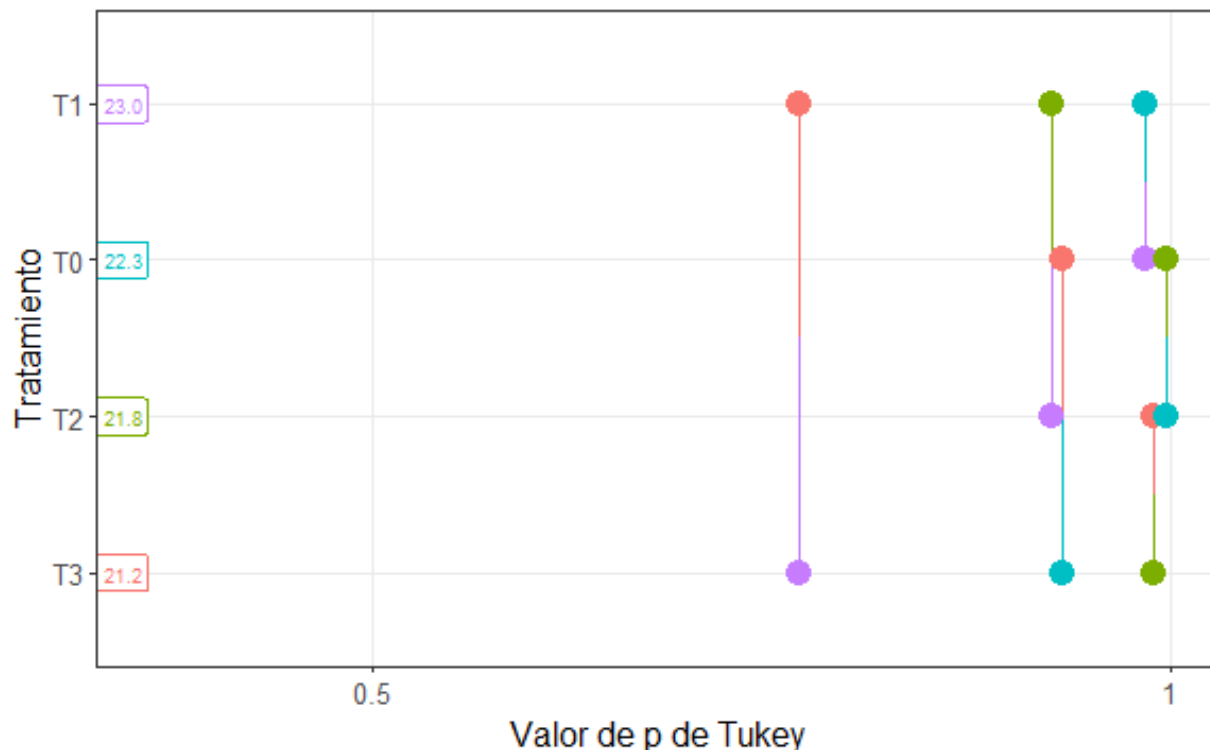


Figura 8. Gráfica del análisis de varianza de la variable número total de ramas (Tukey, $P \leq 0.05$).

5.4.5. Frutos del primer ensayo de producción

La aplicación de los tratamientos mostro un efecto de manera positiva al primer ensayo de producción, ya que presentó diferencias altamente significativas (Tukey, $P \leq 0.05$). El tratamiento de 3 kg de lombricomposta T3 presentó el promedio de frutos más alto en un 83% respecto al tratamiento testigo (T0). El tratamiento T1 (55 frutos) con un 1 kg de lombricomposta obtuvo el valor promedio más bajo del número de frutos. Mientras que el tratamiento T3 de 3 kg de lombricomposta obtuvo el valor promedio más alto de 272 frutos (Figura 9). En cultivos café a plena exposición solar, la aplicación de lombricomposta a 2 kg planta⁻¹ año⁻¹ se pueden obtener producciones comparables al uso de fertilizantes químicos (Arcila y Farfán, 2007). El uso de la composta contribuye a mejorar la fertilidad del suelo donde está establecido el cultivo de café, la absorción de nutrientes por la planta y reflejado en el contenido de nutrientes en las hojas, la tasa de crecimiento de las ramas y el aumento de hasta un 14 % el rendimiento a la aplicación de 3 kg de composta + una fracción de fertilizante químico (Anh *et al.*, 2013). Karim *et al.* (2021) mencionan que con la aplicación de pulpa de café en la fase reproductiva de 8-12 t ha⁻¹ (5 kg - 7.5 kg planta⁻¹) se logran producciones más altas en cafetales bajo sombra de Brasil.

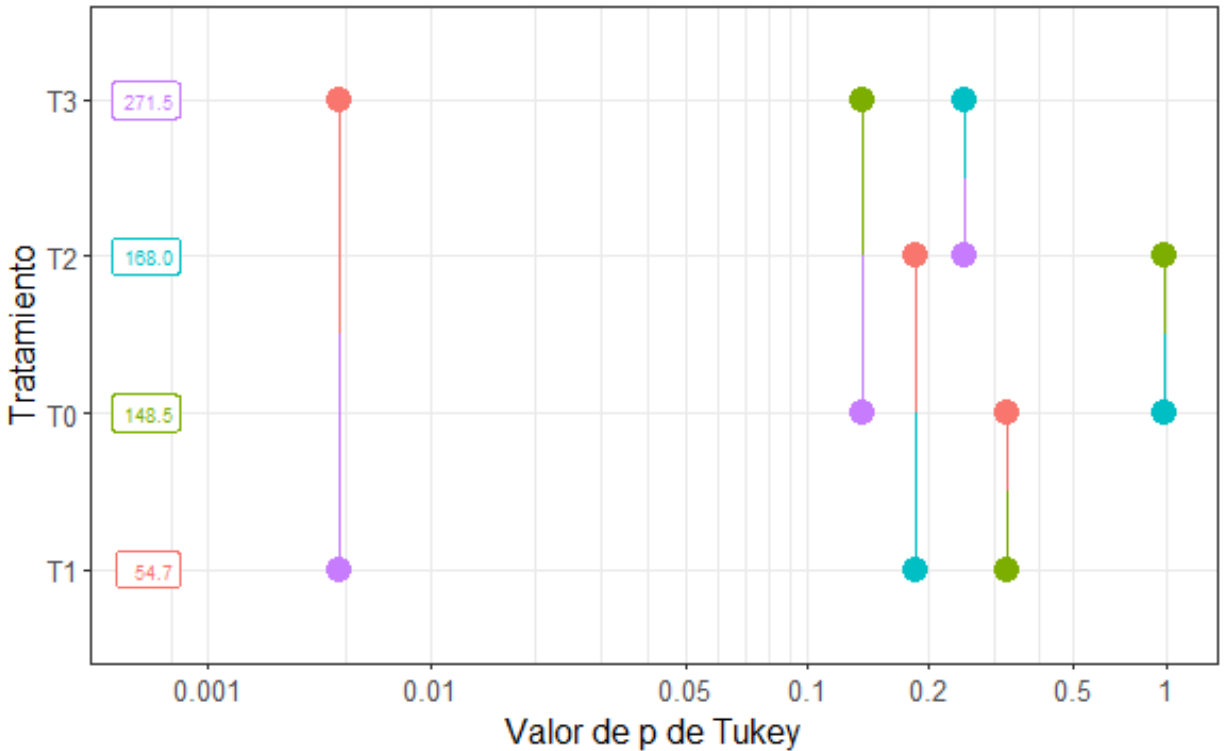


Figura 9. Gráfica de análisis de varianza de la variable de frutos del primer ensayo de producción (Tukey, $P \leq 0.05$)

VI. CONCLUSIONES

La aplicación del T3 afectó los contenidos de macronutrientes N, P, K, Ca y Mg en el suelo, pero el P disponible fue muy bajo en todos los tratamientos aplicados. Los incrementos de Ca y Mg pueden estar atribuido por la aplicación de cal dolomita al suelo. Los micronutrientes Fe, Cu, y Mn obtuvieron valores altos en todos los tratamientos aplicados al suelo excepto el Zn, el T3 obtuvo los valores más altos.

Los contenidos foliares de macronutrientes N, P, K fueron óptimos en todos los tratamientos. El P disponible fue bajo en el suelo, pero en las hojas alcanzó valores óptimos; esto puede deberse a que en el suelo se alojan una gran variedad de microorganismos que favorecen a la solubilización del fósforo, entre ellos las micorrizas. Los contenidos foliares de micronutrientes Fe, Cu, Mn, Zn y B tuvieron niveles óptimos y altos, esto podría deberse a la aplicación foliar de caldo visosa y por la alta disponibilidad de esos elementos en el suelo.

La aplicación de los tratamientos al suelo no afectó de manera significativa al crecimiento vegetativo, no se encontraron diferencias significativas con relación a: la altura de la planta, diámetro del tallo, número total de hojas y número total de ramas. Sin embargo, fue altamente significativa en el número de frutos del primer ensayo de producción a la aplicación de T3.

VII. RECOMENDACIONES

Debe valorarse la pertinencia de hacer un trabajo de registro de datos en campo con más tiempo y ver si existe la posibilidad de tener respuesta favorable de las mismas dosis en la fase estrictamente vegetativa, es decir, inmediatamente después del trasplante y antes de la fase reproductiva.

Considerando la acidez y la baja disponibilidad de fósforo en el suelo sería recomendable probar diferentes niveles de cal dolomita para corregir el problema de la acidez y además de que aporta calcio y magnesio al suelo.

Parece conveniente probar la efectividad del caldo visosa en el control de la roya y así como abono foliar para corregir las deficiencias de micronutrientes, dado que los contenidos foliares de la planta fueron óptimos y altos, y aun no podemos precisar el factor que mayor incidencia tuvo.

Apoyo en el enfoque de agroecosistemas deberá atenderse la cuestión de la nutrición de los cafetos con base en la complejidad de los suelos cafetaleros, para lo cual deberán considerarse diferentes posibilidades para un manejo integral del recurso suelo.

VIII. LITERATURA CITADA

- Aguilar, C. E., Alvarado, I., Martínez, F. B., Galdámez, J., Gutiérrez, A., y Morales, J. A. (2016). Evaluación de tres abonos orgánicos en el cultivo de café (*Coffea arabica* L.) en etapa de vivero. *Siembra*, 3(1), 11–20. <https://doi.org/10.29166/SIEMBRA.V3I1.211>
- Alexandre, A. A., Hernández, A. H., y Retureta, A. (2017). Manejo sostenible de suelos cafetaleros. En C. Morales, E. Acosta, A. Hruska, & A. Posas (Eds.), *Manejo del cafetal un enfoque agroecológico para la agricultura familiar mesoamericana* (pp. 15–28). Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura-FAO.
- Anh, N., Trung, T., & Phuong, V. T. (2013). Evaluation of coffee husk compost for improving soil fertility and sustainable coffee production in rural central highland of Vietnam. *Resources and Environment*, 3(4), 77–82. <http://article.sapub.org/10.5923.j.re.20130304.03.html>

- Arcila, J., y Farfán, F. (2007). Consideraciones sobre la nutrición mineral y orgánica en los sistemas de producción de café. En J. Arcilla-Pulgarín, F. Farfán-Valencia, A. M. Moreno-Berrocal, L. F. Salazar-Gutiérrez, & E. Hincapié-Gómez (Eds.), *Sistemas de producción de café en Colombia* (1ra ed., pp. 201–232). Cenicafé. <https://biblioteca.cenicafe.org/handle/10778/720>
- Arnold, J. (2001). *Manual de caficultura* (3a ed.). Instituto Hondureño del café.
- Ávila, W. E., Sadeghian, S., Sánchez, P. M., & Castro, H. E. (2010). Respuesta del café al fósforo y abonos orgánicos en la etapa de almácigo. *Cenicafé*, 61(4), 358–369. <https://biblioteca.cenicafe.org/bitstream/10778/509/1/arc061%2804%29358-369.pdf>
- Bertalanffy, L. v. (1968). *Teoría General de los Sistemas*. Fondo de Cultura Económica.
- Bidwell, R. G. S. (1993). *Fisiología Vegetal* (A. G. T Editor, Ed.).
- Canseco, D. A., Villegas, Y., Castañeda, E., Carrillo, J. C., Robles, C., y Santiago, G. M. (2020). Respuesta de *Coffea arabica* L. a la aplicación de abonos orgánicos y biofertilizantes. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 11(6), 1285–1298. <https://doi.org/10.29312/REMEXCA.V11I6.2612>
- Casierra, F., y Aguilar, O. E. (2007). Estrés por aluminio en plantas: reacciones en el suelo, síntomas en plantas y posibilidades de mejora. Una revisión. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 1(2), 246–257. <https://doi.org/10.17584/RCCH.2007V1I2.8701>
- Castillo, G., Contreras, A., Zamarripa, A., Méndez, I., Vázquez, M., y Holguín, F. (1997). *Tecnología para la producción de café en México. Folleto Técnico 8*. INIFAP.
- Castro, A., Henríquez, C., y Bertsch, F. (2009). Capacidad de suministro de N, P y K de cuatro abonos orgánicos. *Agronomía Costarricense*, 33(1), 31–43. <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/agrocost/article/view/6733>
- Castro, S. (2017). El calcio es un nutriente limitante en cafetales bajo manejo intensivo de fertilizantes en ultisoles. *Agronomía Costarricense*, 41(1), 105–119. <https://doi.org/10.15517/RAC.V41I1.29756>
- CERTIMEX (Certificadora Mexicana de Productos y Procesos Ecológicos). (1998). *Normas para la producción y procesamiento de productos ecológicos*. Universidad Autónoma Chapingo.
- Chiavenato, I. (1997). Teoría de sistemas. En McGrawHill (Ed.), *Introducción a la Teoría General de la Administración* (Cuarta edición, pp. 725–761).
- Contreras, A. (2000). *Áreas con potencial productivo para cultivar café en el estado de Veracruz: Un enfoque regional. Informe Técnico*. INIFAP. Campo Experimental Xalapa.
- Cosme, R., Reynoso, A., Adama, E. R., y Pocomucha, V. (2020). Efecto del abono orgánico acelerado en plántones de café (*Coffea arabica* L.). *Anales Científicos*, 81(2), 376–384. <https://doi.org/https://doi.org/10.21704/ac.v81i2.1667>

- Destroix, F., & Wintgens, J. N. (2004). Establishing a coffee plantation. En J. N. Wintgens (Ed.), *Coffee: Growing, Processing, Sustainable production* (Wiley-VCH, pp. 178–245).
- Díaz, L. A., Rivera, E. L., & Sánchez, N. (2021). Occurrence of arbuscular mycorrhizal fungi in leaf litter and roots of shaded coffee plantations under organic and conventional management. *Revista Brasileira de Ciência Do Solo*, 45, 1–14. <https://doi.org/10.36783/18069657RBCS20200110>
- Díaz, M. A., & Córdoba, C. A. (2020). Estudio de la estructura del agroecosistema cafetero mediante el diagrama de ciclos causales. Estudio de caso (Cundinamarca, Colombia). *Revista de Estudios Sobre Despoblación y Desarrollo Rural*, 28, 135–160. <https://doi.org/https://doi.org/10.4422/ager.2019.08>
- Díaz, G., Guajardo, R. A., y López, R. (2013). Potencial productivo del cultivo de café en México. En R. López-Morgado, G. Díaz-Padilla, & A. Zamarripa-Colmenero (Eds.), *El sistema producto café en México* (1ra ed., pp. 35–54). INIFAP (Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias).
- Durán, L., y Henríquez, C. (2007). Caracterización química, física y microbiológica de vermicompostes producidos a partir de cinco sustratos orgánicos. *Agronomía Costarricense*, 31(1), 41–51.
- Durán, L., y Henríquez, C. (2009). Crecimiento y reproducción de la lombriz roja (*Eisenia foetida*) en cinco sustratos orgánicos. *Agronomía Costarricense*, 33(2), 275–281. <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/agrocost/article/view/6726>
- Escamilla, E. (2007). *Influencia de los factores ambientales, genéticos, agronómicos y sociales en la calidad del café orgánico en México* [Tesis]. Colegio de Postgraduados.
- Escamilla, E., Barrera, M., y Cornejo, C. (2016). *Variedades comerciales de café: Una guía descriptiva* (1ra ed.). SAGARPA, COFUPRO, CENACAFÉ, Universidad Autónoma Chapingo.
- Escamilla, E., Ruíz, O., Díaz, G., Landeros, C., Platas, D. E., Zamarripa, A., & González, V. A. (2005). *El agroecosistema café orgánico en México*. Manejo Integrado de Plagas y Agroecología. https://www.researchgate.net/publication/260080032_El_agroecosistema_cafe_organico_en_Mexico
- Escamilla, E., Tinoco, J. Á., Pérez, H. A., Aguilar, Á. J., Sánchez, R., y Ayala, D. (2021). Transformación socioecológica en el agroecosistema café afectado por roya en Chiapas, México. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 44(4), 643–653.
- García, M. E., Díaz, G. O., Castañeda, E., Lozano, S., y Pérez, M. I. (2017). Caracterización del agroecosistema de café bajo sombra en la cuenca del río Copalita. *Revista Mexicana de Agronegocios*, 21(40), 635–648. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=14152127011>

- Garza, R., Maldonado, R., Álvarez, M. E., y Torres, J. A. (2020a). Caracterización de especies arbóreas asociadas al cultivo de café. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 11(1), 25–32. <https://doi.org/10.29312/REMEXCA.V11I1.2210>
- Garza, R., Maldonado, R., Álvarez, Ma. E., y Buendía, J. C. (2020b). Aporte nutrimental de especies arbóreas fijadoras de nitrógeno en sistemas agroforestales con café. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 11(4), 801–814. <https://doi.org/10.29312/REMEXCA.V11I4.2465>
- Henríquez, C. (2005). Sorción y desorción de fósforo en un andosol de Costa Rica dedicado al cultivo de café, caña de azúcar y bosque. *Agronomía Costarricense*, 29(3), 97–105.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). (2010). *Compendio de información geográfica municipal 2010, Simojovel, Chiapas*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. https://www.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos/07/07081.pdf
- INMECAFÉ-NESTLÉ. (1990). *El cultivo del cafeto en México*. Instituto Mexicano del café-Nestlé.
- Jiménez, F. A., Agromonte, D., Ramírez, M., Pérez-, M., la O, M., Pons, M., y Collado, R. (2012). Uso de humus de lombriz en la formulación de sustratos para la aclimatización de cultivos tropicales. *Centro Agrícola*, 39(3), 37–44.
- Karim, A., Hifnalisa, H., & Manfarizah, M. (2021). Analysis of arabica coffee productivity due to shading, pruning, and coffee pulp-husk organic fertilizers treatments. *Coffee Science*, 16, 1–8. <https://doi.org/10.25186/V16I1.1903>
- López, W., Castro, I., Salinas, E., Reynoso, R., y López, J. (2016). Propiedades de los suelos cafetaleros en la Reserva de la Biósfera El Triunfo, Chiapas, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 7(3), 607–618. <https://doi.org/10.29312/remexca.v7i3.320>
- López, W., Urbina, L. H., Reynoso, R., y Martínez, J. (2018). Efectos del encalado en suelo ácido cultivado con café (*Coffea arabica* L.) en la Reserva de la Biosfera El Triunfo, Chiapas, México. *Agro Productividad*, 11(4), 55–60. <https://revista-agroproductividad.org/index.php/agroproductividad/article/view/270>
- Martínez, C. (1996). *Potencial de la lombricultura: elementos básicos para su desarrollo* (A. Carballo & S. Bravo, Eds.).
- Mengel, K., & Kirkby, E. A. (2000). *Principios de nutrición vegetal* (4a ed.). International Potash Institute.
- Mogollón, J. P., García-Miraya, J., Sánchez, L. F., Chacón, N., & Araujo, J. (1997). Nitrógeno potencialmente disponible en suelos de cafetales bajo diferentes árboles de sombra. *Agronomía Tropical*, 47(1), 87–102.
- Monge, L. F. (1999). Manejo de la nutrición y fertilización del cultivo de café orgánico en Costa Rica. *XI Congreso Nacional Agronómico/ III Congreso Nacional de Suelos*, 175–191. http://infocafes.com/portal/wp-content/uploads/2015/12/a50-6907-III_175.pdf

- Monsalve, O. I., Gutiérrez, J. S., y Cardona, W. A. (2017). Factores que intervienen en el proceso de mineralización de nitrógeno cuando son aplicadas enmiendas orgánicas al suelo. Una revisión. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 11(1), 200–209. <https://doi.org/10.17584/RCCH.2017V11I1.5663>
- Mosquera, A. T., Melo, M. M., Quiroga, C. G., Avendaño, D. M., Barahona, M., Galindo, F. D., Lancheros, J. J., Prieto, S. A., Rodríguez, A., y Sosa, D. N. (2016). Evaluación de fertilización orgánica en caféto (*Coffea arabica*) con pequeños productores de Santander, Colombia. *Temas Agrarios*, 21(1), 90–101. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5744185&info=resumen&idioma=ENG>
- Nájera, O. (2002). El café orgánico en México. *Cuadernos de Desarrollo Rural*, 48, 59–75.
- OIC (Organización Internacional del Café. (2020). *Datos históricos sobre el comercio mundial de café*. Organización Internacional Del Café. https://www.ico.org/new_historical.asp
- Ortega, A., y Ramírez, B. (2013). Crisis de la cafeticultura y migración en el contexto de la pobreza y marginación. El caso de los productores indígenas de Huehuetla, Puebla. *Ra Ximbai*, 9(1), 173–186.
- Platas, D. E., Vilaboa, J., y Campbell, W. (2016). Una aproximación dialéctica a los agroecosistemas. *Agro Productividad*, 9(12), 82–86. <https://revista-agroproductividad.org/index.php/agroproductividad/article/view/866>
- Platas, D. E., Vilaboa, J., González, L., Severino, V. H., López, G., y Vilaboa, I. (2017). Un análisis teórico para el estudio de los agroecosistemas. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 20, 395–399. <https://www.redalyc.org/pdf/939/93953814017.pdf>
- Pool, L., León, N. S., y Pérezgrovas, V. (1998). Harina de hueso adicionada a suelos de la zona cafetalera de los altos de Chiapas, México. *Terra Latinoamericana*, 16(1), 71–77. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57316109>
- Ramos, E. V., Delgado, Z. Y., Murillo, R. A., Muñoz, V. E., y Hoyos, J. (2021). Evaluación de bacterias endofíticas solubilizadores de fósforo en café, una alternativa sostenible. *Biotecnología En El Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 19(2), 94–107. <https://doi.org/10.18684/BSAA.V19.N2.2021.1554>
- Restrepo, J. (2007). *Manual práctico el A, B, C de la agricultura orgánica y harina de rocas* (1a ed.).
- Rodríguez, M., y Morales, V. (2005). Toxicidad por manganeso en huertos de mango Haden en Venezuela. *Instituto de La Potasa y El Fósforo. Informaciones Agronómicas*, 56, 9–10.
- Romero, A. C. (1999). *Producción de almácigo de café con abonos orgánicos*. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE).
- Rosales, V., Martínez, J. P., & Casanova, L. (2020). Coffee agroecosystem in Mexico: productive culture between tradition and change. *Agroproductividad*, 13(11), 75–80. <https://doi.org/https://doi.org/10.32854/agrop.v13i11.1817>

- Rosas, J., Escamilla, E., y Ruiz, O. (2008). Relación de los nutrimentos del suelo con las características físicas y sensoriales del café orgánico. *Terra Latinoamericana*, 26(4), 375–384. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57313051010>
- Ruelas, L. C., Nava, M. E., Cervantes, J., y Barradas, V. L. (2014). Importancia ambiental de los agroecosistemas cafetaleros bajo sombra en la zona central montañosa del estado de Veracruz, México. *Madera y Bosques*, 20(3), 27–40. <https://doi.org/10.21829/MYB.2014.203149>
- Sadeghian, S. (2008). *Fertilidad del suelo y nutrición del café en Colombia: Guía Práctica* (FNC-Cenicafé, Ed.).
- Sadeghian, S. (2009). Calibración de análisis de suelo para N, P, K y Mg en cafetales al sol y bajo sombra. *Cenicafé*, 60(1), 7–24. [https://www.cenicafe.org/es/publications/arc060\(01\)007-024.pdf](https://www.cenicafe.org/es/publications/arc060(01)007-024.pdf)
- Sadeghian, S. (2013). Nutrición de cafetales. En FNC-Cenicafé (Ed.), *Manual del cafetero colombiano: investigación y tecnología para la sostenibilidad de la caficultura* (pp. 85–116). Cenicafé.
- Sadeghian, S., y Díaz, C. (2020). Corrección de la acidez del suelo: alteraciones químicas del suelo. *Cenicafé*, 71(1), 7–20. https://www.cenicafe.org/es/index.php/nuestras_publicaciones/revista_cenicafe/publicaciones_arc07101007_020correccion_de_la_acidez_del_suelo_alteraciones
- Salamanca, A., y González, H. (2020). Respuesta del café a la aplicación foliar de nutrientes. *Cenicafé*, 71(2), 124–142.
- Salamanca, A., Sadeghian, S., y Amézquita, E. (2004). Densidad aparente de dos suelos de la zona cafetera y efecto sobre el crecimiento del café. *Cenicafé*, 55(4), 330–340. <https://biblioteca.cenicafe.org/handle/10778/245>
- Secretaría de economía. (2007). *Norma mexicana NMX-FF-109-SCFI-2007. Humus de Lombriz (lombricomposta). Especificaciones y métodos de prueba*. Diario Oficial de la Federación.
- Segura, J. (2013). Desarrollo vegetal: Introducción al desarrollo. Concepto de hormona vegetal. En J. Azcón-Bieto & M. Talón (Eds.), *Fundamentos de fisiología vegetal* (2a ed., pp. 349–376). McGraw Hill.
- SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera). (2021). *Anuario estadístico de la producción agrícola*. SIAP. <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>
- Snoeck, J., & Lambot, C. (2004). Crop maintenance. Fertilization. En J. N. Wintgens (Ed.), *Coffee: Growing, processing, sustainable production* (pp. 246–269). Wiley-VCH Verlag.
- Sosa, L., Escamilla, E., y Díaz, S. (2004). Organic coffee. En J. E. Wintgens (Ed.), *Coffee: Growing, processing, sustainable production* (pp. 339–354). WILEY-VCH Verlag.

- Trinidad, A., y Velasco, J. (2016). Importancia de la materia orgánica en el suelo. *Agro Productividad*, 9(8), 52–58. <https://www.revista-agroproductividad.org/index.php/agroproductividad/article/view/802>
- Vargas, P., y Castro, L. (2019). Aislamiento y evaluación de microorganismos solubilizadores de fósforo de andisoles de Costa Rica. *Agronomía Costarricense*, 43(1), 47–68. <https://doi.org/10.15517/rac.v43i1.35649>
- Velasco, E., Nieto, R., y Navarro, E. R. (2011). *Cultivo de tomate en hidroponía e invernadero* (Universidad Autónoma Chapingo, Colegio de Postgraduados, & Mundi-Prensa México, Eds.; 3a ed.).
- Villarreyna, R., Avelino, J., y Cerda, R. (2020). Adaptación basada en ecosistemas: efecto de los árboles de sombra sobre servicios ecosistémicos en cafetales. *Agronomía Mesoamericana*, 31(2), 499–516. <https://doi.org/https://doi.org/10.15517/am.v31i2.37591>
- Zamarripa, A., y Escamilla, E. (2016). *Variedades de café en México: Origen, características y perspectivas* (2a ed.). SAGARPA, COFUPRO, CENACAFÉ, Universidad Autónoma Chapingo.
- Zetina, R., Vázquez, A., Díaz, G., & López, R. (2013). Suelos y nutrición del cafeto. En R. López-Morgado, G. Díaz-Padilla, & A. Zamarripa-Colmenero (Eds.), *El sistema producto café de México: problemática y tecnología de producción* (1ra ed., pp. 209–234).

ANEXOS



Parcela experimental en Yuquín, Simojovel, Chiapas.



Toma de la muestra foliar en el tercer o cuarto pares de hojas.



Aplicación del tratamiento (lombricomposta) en la base del tallo de la planta.



Aplicación de cal dolomita en la base de la planta.



Aplicación de caldo visoso con una mochila aspersora.



Medición de la altura de la planta de café.



Planta de café en su primer ensayo de producción.



Hojas de cafeto de la variedad Colombia con pústulas de roya (*Hemileia vastatrix*).